



EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN, FLUJO Y TRANSPORTE DE CLORUROS EN UN SUELO APLICANDO UN BIOCARBONIZADO

Diana Catalina Jiménez Torres

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá D.C., Colombia
2020

Evaluación de la retención, flujo y transporte de cloruros en un suelo aplicando un biocarbonizado.

Diana Catalina Jiménez Torres

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Recusos Hidráulicos

Director:

Prof. Leonardo David Donado Garzón
Profesor Asociado

Codirectora:

Prof. Yazmin Yaneth Agámez Pertuz
Profesora Asociada

Línea de Investigación:

Modelación de fenómenos y amenazas naturales

Grupos de Investigación:

HYDS

LICE

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá D.C., Colombia

2020

Dedicatoria

A la energía más poderosa que no se puede cuantificar ni explicar, Dios, quien hizo que todo esto convergiera en un resultado que más que académico, fuera de crecimiento personal. A mi mamá, quien sufrió conmigo las vicisitudes del proceso investigativo y oró por ellas; a mi papá, quien me dio calma cuando las cosas no salían como esperaba; a mi hermano, quien apoyó mis decisiones y cambios de rumbo; a mis sobrinos, quienes me dieron la fuerza para finalizar; a mis amigas, quienes comprendieron con paciencia que mi estado anímico dependía de los avances de la tesis, y a mi amado esposo, quien me levantó, me guió, sufrió y se alegró conmigo, me acompañó largas jornadas de experimentos, aprendió conmigo y me enseñó con el ejemplo, la importancia de la disciplina.

Agradecimientos

Agradezco a la Asociación Colombiana de Ingenieros de Petroelios (ACIPET) quienes apoyaron la salida a campo, toma de muestras, materiales y análisis de laboratorios, en especial al ingeniero Benjamín Garavito, quien me prestó toda su colaboración en el desarrollo de la investigación. Al señor Cesar Paredes, quien prestó su finca para llevar a cabo la experimentación. Al laboratorio de Ingeniería Ambiental, donde el equipo de trabajo me abrió las puertas para realizar ensayos. Al profesor Carlos González quien me facilitó el laboratorio de Física de suelos en horarios extendidos. A la profesora Maria José Martinez, quien compartió su conocimiento en transporte de solutos. AL profesor Leonardo Donado Garzón, quien me abrió un espacio de trabajo en el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos, me facilitó los equipos para llevar a cabo la experimentación e impulsó la investigación. A la profesora Yazmin Agámez Pertuz por todo su tiempo y energía, quien me inspiro, motivó y guió la investigación.

Resumen

Esta investigación estudia el cambio de las propiedades de flujo de agua y transporte solutos en suelos regados con agua de producción de hidrocarburos que contienen cloruros mediante la aplicación de biocarbonizados, como una alternativa apropiada y menos costosa para mitigar los impactos y a su vez mejorar las condiciones físico-químicas del suelo en la zona vadosa. El desarrollo de esta tesis se llevó a cabo en tres etapas; en la primera, se realizó el muestreo de columnas inalteradas en campo y toma de muestras para la caracterización del suelo testigo; en la segunda se hizo la experimentación en laboratorio, donde se caracterizó el suelo y los tres biocarbonizados y, se determinó la retención de cloruros el tiempo de equilibrio y las isothermas de adsorción con un estudio por lotes para cada biocarbonizado (BC); a partir de esta información se seleccionó el BC más apropiado, se combinó con el suelo y se caracterizó para evaluar el cambio en sus propiedades físico-químicas, donde se evidenció la mejora en el pH, la notable disminución del aluminio intercambiable y como se esperaba, el aumento de carbono orgánico. Se obtuvieron los parámetros de flujo, como la curva de retención de humedad y la curva de conductividad hidráulica, adicionalmente se realizó la toma de datos de los parámetros de transporte con las curvas del effluente. La tercera etapa fue la modelación numérica, utilizando la herramienta RETC para la obtención de los parámetros de flujo para cada horizonte y el horizonte con el BC, donde se evidenció que la humedad aprovechable se triplicó con la incorporación del BC. Los parámetros de transporte en modelos de equilibrio y no equilibrio se encontraron con el software STANMOD a partir de las curvas del effluente, poniendo en evidencia el efecto del BC en el retardo del pico máximo de la concentración de cloruros y la disminución considerable del coeficiente de dispersión. Estos resultados sirvieron para modelar en HYDRUS los dos escenarios del suelo testigo y el suelo con BC, validado con datos experimentales obtenidos de las columnas de suelo.

Abstract

This research studies the change in the properties of water flow and solute transport in soils irrigated with hydrocarbon production water containing chlorides by applying biochars. Biochar is considered as an appropriate and less expensive alternative to mitigate chloride impacts as well as to improve physical-chemical soil conditions in the vadose zone. The development of this thesis was carried out in three stages; at first, It was carried out the sampling of undisturbed soil columns for experimentation and the control column one; in the second stage, the laboratory experimentation was set up. It was obtained the soil water and solute transport parameters, in addition to the three biochars used. The retention of chlorides, the equilibrium time and the chloride adsorption isotherms were determined with a batch study for each biochar. It was selected the most appropriate biocarbon; from the results obtained previously, where the improvement in pH, the notable decrease in exchangeable aluminum and as expected was evidenced , the increase of organic carbon. The flow parameters were obtained, such as the moisture retention curve and the hydraulic conductivity curve, additionally data was taken from the transport parameters with the breakthrough curves. The third stage was the numerical modeling, using the RETC tool to obtain the parameters for each horizon and the horizon with the biochar, where it was evidenced that the usable humidity tripled with the incorporation of the biochar. The transport parameters in equilibrium and non-equilibrium models were found with the STANMOD software based on the breakthrough curves, evidencing the existence of changes in the dispersion coefficient, pore velocity and delay coefficient. These results served to model in HYDRUS the two scenarios of the control soil and the soil with biochar, validated with experimental data obtained from the soil columns.

Keywords: soils, biochar, flow parameters, transport parameters, numerical modeling, vadose zone, RETC, STANMOD, HYDRUS

Ponencias

- Se participó como ponente en el curso de extensión de la Universidad Nacional de Colombia CURSO DE CAPACITACIÓN PARA VALIDACIÓN DE LA GUÍA PARA LA MODELACIÓN DEL FLUJO DE CONTAMINANTES EN LA ZONA NO SATURADA DEL SUELO.
Realizado 25 de noviembre al 29 del noviembre de 2019 en la ciudad de Bogotá D.C.
- El Comité Organizador del CONGRESO COLOMBIANO DEL CARBONO, C3-2020, ACEPTÓ la presentación al congreso en modalidad ORAL, el trabajo: BIOCARBONIZADOS APLICADOS A UN SUELO (OXISOL) PARA EL MEJORAMIENTO DE SUS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E HIDRODINÁMICAS.
- El XXIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología APROBÓ para artículo completo, el resumen titulado Evaluación del flujo y transporte de cloruros en la zona vadosa aplicando un biocarbonizado

Contenido

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Agradecimientos	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tablas	xv
Lista de símbolos	xvi
1 Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	4
1.2.1 General	4
1.2.2 Específicos	4
2 Antecedentes y marco conceptual	5
2.1 Agua de Producción de hidrocarburos	5
2.2 Biocarbonizados	6
2.3 Propiedades Físicas y Químicas de los suelos	7
2.3.1 Propiedades Físicas	7
2.3.2 Propiedades Químicas	9
2.4 Flujo y transporte en la zona no saturada	11
2.4.1 Movimiento del agua en el suelo	11
2.4.2 Transporte de solutos	14
3 Metodología	17
3.1 Muestreo en campo	17
3.1.1 Selección del suelo testigo	17
3.2 Pruebas de laboratorio	23
3.2.1 Caracterización del suelo testigo	23
3.2.2 Biocarbonizados y su caracterización	24
3.2.3 Selección del biocarbonizado	25

3.2.4	Parámetros de flujo	28
3.2.5	Parámetros de transporte	30
3.3	Modelación numérica de flujo y transporte	33
3.3.1	RETC	33
3.3.2	STANMOD	33
3.3.3	HYDRUS 1D	34
4	Resultados y discusión	36
4.1	Propiedades físico-químicas del suelo y los biocarbonizados	36
4.1.1	Caracterización suelo testigo	36
4.1.2	Caracterización de biocarbonizados	40
4.1.3	Isotermas de adsorción	43
4.1.4	Caracterización suelo + biocarbonizado	45
4.2	Variables hidrodinámicas	47
4.2.1	Pruebas en campo	47
4.2.2	Pruebas de laboratorio	49
4.3	Parámetros de transporte de solutos	52
4.3.1	Curvas del efluente o BTC	53
4.4	Resultados del modelo de flujo y transporte	58
4.4.1	Simulación en HYDRUS	58
4.4.2	Validación del modelo	61
5	Conclusiones y recomendaciones	64
5.1	Conclusiones	64
5.2	Recomendaciones	65
	Bibliografía	66
6	Anexos	71

Lista de Figuras

2-1. Diagrama esquemático considerando el suelo como un sistema trifásico. basado y modificado de (Jaramillo, 2002) y (LIMA, 2003)	8
3-1. Ubicación espacial de la zona de estudio	18
3-2. Mapa de suelos de la finca La Rusia	19
3-3. Calicata CA-01	20
3-4. Monolitos tubulares	21
3-5. Prueba de infiltración en campo	22
3-6. Prueba de conductividad hidráulica saturada en campo (Ks). Metodo Porchet.	23
3-7. Titulación de cloruros con titulación argentométrica (cambio de color)	26
3-8. Montaje Conductividad saturada en laboratorio	29
3-9. Mezcladora de suelo con biocarbonizado	30
3-10. Montaje de curvas del efluente, donde se observa el tanque del trazador y el tanque de agua, la bomba peristáltica y el conductivímetro	32
3-11. Muestras de agua del efluente de la columna a determinados tiempos para cuantificación de cloruros en cromatógrafo iónico	33
3-12. Escenarios a modelar en hydrus, siendo (a) el suelo testigo y (b) el suelo con la adición del biocarbonizado a los 10 cm superiores. (Tomado de Hydrus 1D)	35
4-1. Análisis elemental y próximo de los biocarbonizados	40
4-2. RAMAN biochar retamo espinoso	41
4-3. RAMAN carbón activado de cuesco de palma	42
4-4. Isoterma de carbón activado de retamo espinoso	43
4-5. Isotermas de los horizontes del suelo	44
4-6. Lámina de agua acumulada	48
4-7. Lámina de agua acumulada	49
4-8. Conductividad saturada de cada horizonte	50
4-9. Conductividad saturada equivalente de las columnas con suelo y suelo 'BCRet	50
4-10. CRH de H1 vs H1+BCRet en RETC	52
4-11. Modelos de transporte del primero horizonte H1 en STANMOD, donde los triángulos son los datos observados que se ajustan al modelo de No equilibrio CDE	53

4-12. Modelos de transporte del horizonte con la adición del BCRet H1+BCRet en STANMOD, donde los triángulos son los datos observados que se ajustan al modelo de no equilibrio CDE	54
4-13. Modelos de transporte del segundo horizonte, H2, donde los triángulos son los datos observados que se ajustan al modelo de no equilibrio en STANMOD	54
4-14. Modelos de transporte ajustados por Stanmod de H1 vs H1+BCRet en condiciones de no equilibrio	55
4-15. Parámetros de transporte de las columnas de suelo testigo, donde los triángulos rojos corresponden a los datos experimentales, en STANMOD	56
4-16. Parámetros de transporte de las columnas de suelo y suelo+BCRet en STANMOD en volumen de poros relativo	56
4-17. Parámetros de transporte de las columnas de suelo y suelo+BCRet en STANMOD con tiempo relativo	57
4-18. Escenarios modelador en HYDRUS, siendo (a) el suelo testigo y (b) el suelo con la adición del biocarbonizado a los 10 cm superiores. (Tomado de HYDRUS 1D)	59
4-19. Escenarios modelados en HYDRUS, donde se muestra la succión en los nodos, siendo (a) el suelo testigo y (b) el suelo con la adición del biocarbonizado a los 10 cm superiores. (Tomado de HYDRUS 1D)	60
4-20. Escenarios modelados en HYDRUS, donde se muestra la variación en las concentraciones con respecto a la profundidad, siendo (a) el suelo testigo y (b) el suelo con la adición del biocarbonizado a los 10 cm superiores. (Tomado de HYDRUS 1D)	60
4-21. Concentraciones en el suelo testigo y el suelo con BCRet con respecto al tiempo (BTC simulado)	61
4-22. Valores experimentales vs valores simulados en la Columna de suelo	62
4-23. Valores experimentales vs valores simulados en la Columna de suelo+BCRet	62

Lista de Tablas

4-1. Descripción perfil de CA-01.	37
4-2. Granulometría por el método de pipeta	38
4-3. Densidades y porosidad del suelo testigo	39
4-4. pH y fósforo del suelo testigo	39
4-5. Elementos mayores y CIC del suelo testigo	40
4-6. Cromatografía iónica y pH de cada biocarbonizado	42
4-7. Constante de adsorción de los biocarbonizados	43
4-8. Parámetros de Freundlich para la adsorción de NaCl	44
4-9. Granulometría del H1 y el H1+BCRet	45
4-10.Densidades y porosidad del H1 y el H1+BCRet	46
4-11.pH y fósforo del H1 y H1+BCRet	46
4-12.Elementos mayores y CIC para el H1 y el H1+BCRet	47
4-13.Infiltración básica del suelo testigo en campo	47
4-14.Conductividad hidráulica saturada, método Porchet	48
4-15.Puntos de retención de humedad	51
4-16.Parámetros de flujo de RETC	51
4-17.Parámetros de transporte de STANMOD para cada horizonte.	55
4-18.Parámetros de transporte de STANMOD para la columna de Suelo y la columna de Suelo+BCRet.	58
4-19.Índices estadísticos para el análisis de comparación de los datos experimentales y los datos simulados en HYDRUS de un suelo testigo y un suelo con BCRet.	63
6-1. Resultados de laboratorio de la cromatografía iónica de la columna de suelo .	71
6-2. Resultados de laboratorio de la cromatografía iónica de la columna de suelo+biocarbonizado	72

Lista de símbolos

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidades
A	Área	m^2
A_{BET}	Área interna del sólido	$\frac{\text{m}^2}{\text{g}}$
A_s	Área transversal de la carga a granel	m^2
a	Coeficiente	1
a	Contenido de ceniza	1
c	Contenido de carbono	1
c	Concentración de la cantidad de materia	$\frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$
D	Diámetro	m
F	Fracción de materia volátil	1
Fr	Número de Froude	1
\vec{g}	Aceleración de la gravedad	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
H	Entalpía	J
H_o	Poder calorífico superior	$\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$
h	Contenido de hidrógeno	1
K	Coeficiente de equilibrio	1
L	Longitud	m
m	Masa	kg
\dot{m}	Flujo de masa	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
n	Velocidad de rotación	$\frac{1}{\text{s}}$
n	Cantidad de materia	mol
P	Presión	Pa
Q	Calor	kJ

Símbolo	Término	Unidades
T	Temperatura	C
t	Tiempo	s
V	Volumen	m ³
\vec{u}	Velocidad	$\frac{m}{s}$
w_i	Fracción en masa del componente i	1
$w_{w,i}$	Contenido de humedad de la sustancia i	1
W	Humedad gravimétrica	<i>adm</i>
Z	Factor de gases reales	1

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidades
η	Espacio poroso	%
θ	Humedad volumetrica	$\frac{P}{L^3}$
ρ_r	Densidad real	$\frac{P}{L^3}$
ρ_s	Densidad aparente	$\frac{P}{L^3}$
α_{BET}	Factor de superficie	$\frac{m^2}{g}$
β_i	Grado de formación del componente i	1
ϵ	Porosidad de la partícula	1
θ_O	Humedad	1
κ	Velocidad de calentamiento	$\frac{K}{s}$
ν	Coeficiente estequiométrico	1
ρ_a	Densidad aparente	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_r	Densidad real	$\frac{kg}{m^3}$
τ	Tiempo adimensional	1
Φ_V	Flujo volumétrico	$\frac{m^3}{s}$
ω	Velocidad angular	$\frac{1}{s}$

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ACIPET</i>	Asociación colombiana de ingenieros de petroleos
<i>AP</i>	Agua de producción
<i>arnd</i>	Aguas residuales no domesticas
<i>BC</i>	Biocarbonizados
<i>BCRet</i>	Biocarbonizado de retamo espinoso
<i>CAC</i>	Carbón activado de Cuesco de palma
<i>CARet</i>	Carbón activado de retamo espinoso
<i>CCH</i>	Curvas de conductividad hidraulica
<i>CDE</i>	Convective dispersive equation
<i>CIA</i>	Capacidad de Intercambio Anionico
<i>CIC</i>	Capacidad de intercambio catiónico
<i>CRH</i>	Curvas de retención de humedad
<i>OI</i>	Ósmosis inversa
<i>3uA</i>	Tercer uso del agua de producción
<i>Va</i>	Volumen de aire
<i>Vw</i>	Volumen de agua
<i>Vs</i>	Volumen de solido
<i>Vp</i>	Volumen de poros
<i>Vt</i>	Volumen total
<i>Pa</i>	Masa de aire
<i>Pw</i>	Masa de agua
<i>Ps</i>	Masa de solido
<i>Pt</i>	Masa total
<i>ZNS</i>	Zona no saturada

1 Generalidades

En este capítulo se exponen los problemas asociados con la cantidad y calidad del agua de producción de hidrocarburos, con su disposición e impacto; así como el estudio edafológico desde el punto de vista de flujo y transporte de solutos en el suelo en la zona no saturada haciendo uso de las propiedades de los biocarbonizados.

1.1. Introducción

La economía de Colombia está basada entre otros, en la industria de hidrocarburos, donde el país dispone de campos petroleros que producen cerca de un millón de barriles de crudo al día (Hidrocarburos, 2016). Sin embargo, dicha producción de petróleo conlleva a la generación de una gran cantidad de agua, la cual se conoce como agua de producción (AP). Su volumen varía entre pozos de acuerdo con la geología y con la antigüedad de los campos petrolíferos, con una tendencia a generar mayor volumen cuanto más antiguo sea el pozo (Kpeglo et al., 2016), alcanzando volúmenes de AP entre 3.785 y 30.280 metros cúbicos por pozo, (Goodwin et al., 2013) que pueden llegar a representar relaciones de 1 barril de crudo por 20 de AP (1/20).

Dicha AP puede provenir tanto del agua originalmente confinada en las formaciones profundas, como agua reinyectada (con otras sustancias) al pozo para la extracción a presión de hidrocarburos (J. Veil, 2004), esta contiene iones metálicos tales como calcio, magnesio, hierro, estroncio, circonio y el ion dominante (motivo de esta investigación), cloruro (Raja et al., 2015), sin embargo, todos los componentes, tanto orgánicos como inorgánicos dependen de la formación geológica con la que el agua tiene contacto (Gen et al., 2015).

En Colombia actualmente se está permitiendo la disposición de esta AP a través de la reinyección de dicha agua en los mismos pozos de explotación o la inyección en lugares aledaños (pozos disposal) lo cual está asociado con problemas asociados a la sismicidad inducida, debido a los cambios de las características del subsuelo al adicionar volúmenes tan grandes de agua. Por otra parte, en muchos de los casos el AP se usa también en aspersión de vías para su mantenimiento, la cual se puede infiltrar contaminando el agua subsuperficial (nivel freático) o se puede movilizar por escorrentía y llegar a cuerpos de agua superficiales, que impacta al suelo como medio de transporte.

Malagon, 2017, explica que la presencia de altas concentraciones de cloruros en aguas subsuperficiales (aljibes) es debida a una falla en la gestión o disposición del agua de producción en el Campo Casabe, dado que ésta ha sido inyectada, reinyectada o dispuesta por aspersión de vías en zonas aledañas, con la consecuente alteración del agua de los aljibes, del suelo que está siendo regado, de la intoxicación de los cultivos y finalmente de la economía y sustento del agricultor.

La anterior problemática, muestra la importancia de la articulación de los problemas encontrados y las necesidades identificadas en cada uno de los sectores de hidrocarburos y agrícola respectivamente; para ello, el sector petrolífero, está especialmente interesado en el aprovechamiento sostenible del agua asociada a la producción de hidrocarburos excedente, para lo cual GaravitoLinares, 2015 afirma que los procesos de tratamiento para dichas aguas están igualmente limitados por su disposición final. Además, la utilización de la ósmosis inversa para el tratamiento del agua, para retirar los cloruros del agua y tratar el agua para que cumpla con la normativa, son costosas, debido a la tecnología, equipos de bombeo y mantenimiento de la membrana semipermeable (Aumesquet, 2017), agravando y encareciendo lo anterior con los volúmenes que se manejan a gran escala todos los días.

Para sustentar la hipótesis del incremento de cloruros en agua subsuperficial asociados con la producción de hidrocarburos, se cuenta con la colaboración de una petrolera (la cual prefiere no revelar su nombre) que comparte la información de análisis de laboratorio del AP de varios bloques petroleros con la Universidad Nacional, de la cual se encontró entre otras cosas, que el contenido de cloruros sobrepasa notablemente la máxima concentración permitida (2000 mg/L) por la norma de vertimientos dada en la RESOLUCIÓN 631 DE 2015 ARTÍCULO 11. “Parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales No Domésticas (arnd) a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con hidrocarburos (Petróleo Crudo, Gas Natural Y Derivados)” confirmando la hipótesis de Malagón y centrando esta investigación en los cloruros.

Por lo cual, se busca una alternativa viable y menos costosa que la ósmosis inversa para retirar las sales del agua, Teniendo en cuenta que el cloruro en el suelo y el agua está como cloruro de sodio (NaCl), es supremamente móvil en el medio poroso como el suelo y se utiliza como el trazador químico más soluble (Melendez et al., 2011) (Norzagaray et al., 2017), ya que normalmente no interactúa ni es retenido por el suelo en condiciones naturales (Antiguedad et al., 1990). Por lo que, en esta investigación se pretende estudiar, por primera vez, el cambio de las propiedades de flujo de agua y transporte de solutos en suelos regados con AP mediante la aplicación de biocarbonizados, como una alternativa apropiada y menos costosa para mitigar los impactos ocasionados por el cloruro y a su vez mejorar las condiciones del suelo.

Los biocarbonizados (BC) son mejoradores de suelos agrícolas que se han implementado desde hace siglos, esto se evidenció en la región amazónica donde se encontraron grandes extensiones de tierra modificada antrópicamente por los precolombinos, denominada por los científicos como “Terra Preta de Indio” (Komang T. and Caroline, 2016), donde se asume que se practicaba la carbonización de bosques y su incorporación para mejorar la fertilidad de suelos muy pobres y ácidos como lo son los oxisoles de esa región, por otra parte, se ha descubierto que además de mejorar propiedades físico químicas y de retención de agua y nutrientes, es un gran secuestrador de carbono a largo plazo, siendo pieza clave en la mitigación de los efectos del cambio climático (Ahmad et al., 2014).

En cuanto a la remediación de suelos contaminados, los estudios son limitados e incipientes en comparación a los relacionados con el tratamiento de aguas (Ahmad et al., 2014), sin embargo, se encuentra que los BC tienen un gran potencial de adsorber y secuestrar contaminantes orgánicos e inorgánicos, debido a su porosidad heterogénea, área y química superficial. Adicional a estas características se pueden dar otros mecanismos de sorción en los BC, donde se investiga la adsorción de iones cloruro debido a las condiciones en las cuales se forma en enlace hidrógeno y las fuerzas de Van der Waals (Sun et al., 2017), y otras investigaciones donde se activa químicamente los BC para conseguir una superficie altamente protonada que pueda atraer en mayor medida a los iones (Mr.M.Shanmugasundaram, Dr.K.Sudalaimani, 2012); se aclara que estas investigaciones se llevaron a cabo para el tratamiento de aguas, por lo cual se quiere analizar su comportamiento al incorporarlo al suelo.

Por otra parte, se quiere llevar a cabo la simulación numérica con el modelo HYDRUS 1D, una vez se tengan los parámetros de flujo y transporte del suelo testigo, para su posterior comparación con el modelo del suelo con el BC seleccionado, evaluando el movimiento del agua y el transporte del cloruro (Vilela et al., 2018). Teniendo en cuenta para ello, la textura del suelo, el cambio en las curvas de retención de humedad, de conductividad saturada, las isothermas de adsorción (Chaves et al., 2009), algunos parámetros químicos como capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y parámetros de transporte de las curvas del efluente, todo a escala laboratorio con muestras inalteradas de suelos (Kanzari et al., 2015).

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Evaluar la retención, flujo y transporte de cloruros en un suelo regado con agua de producción de hidrocarburos tratada, aplicando un biocarbonizado

1.2.2. Específicos

1. Examinar la retención de cloruros en diferentes biocarbonizados para seleccionar el mas adecuado en su aplicación en un suelo testigo.
2. Determinar el efecto de la adición del biocarbonizado seleccionado en las propiedades hidrodinámicas de un suelo testigo.
3. Definir los parámetros de transporte de cloruros a través del suelo testigo y el suelo con el biocarbonizado seleccionado para el modelamiento de flujo y transporte.

2 Antecedentes y marco conceptual

En este capítulo se dan las herramientas básicas como definiciones y ecuaciones con las cuales se desarrolla la metodología y la experimentación en los capítulos siguientes. Se inicia por la descripción del agua de producción de hidrocarburos, definición y antecedentes de biocarbonizados en el suelo, conceptualización de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos e introducción a las ecuaciones que explican el movimiento del agua y transporte de solutos en la zona vadosa.

2.1. Agua de Producción de hidrocarburos

Se refiere al agua de producción de hidrocarburos (AP) como el agua procedente o resultante de los procesos de exploración y explotación de hidrocarburos, que presenta en la actualidad dos problemas, en cuanto a cantidad y calidad de la misma para su disposición, debido a que la relación agua-petróleo corresponde al número de barriles de agua que se producen para obtener un barril de crudo (Mesa et al., 2018), y esta relación depende de la geología del lugar y de la madurez o tiempo en funcionamiento del campo.

La disposición de esta AP es un problema, ya que a pesar de existir variadas opciones para el tratamiento del agua de retorno, muchas están limitadas por los altos costos de capital y operativos (Gregory et al., 2011a), por lo cual, la opción más utilizada para la gestión del AP es la disposición por inyección en pozos *disposal* o reinyectándola en pozos en funcionamiento para energizar el sistema y extraer crudo. Sin embargo, hay regiones donde los sitios de inyección de pozos profundos evidencian sismicidad inducida debido al cambio de las características hidrogeológicas iniciales del sistema (Scanlon et al., 2019).

Adicional al problema de cantidad y su disposición, existe una creciente preocupación pública sobre el manejo de esta agua debido a los impactos en para la salud humana y el medio ambiente (Gregory et al., 2011b), debido a que contiene grasas y aceites, metales pesados como estroncio, bario, cadmio, cromo, plomo y mercurio, gases como ácido sulfhídrico, cationes como magnesio, sodio, hierro y aniones como cloruros, sulfatos y bicarbonatos (Mesa et al., 2018). Evidenciando que en condiciones normales, el valor de cloro duplica los valores máximos permitidos por estándares internacionales, lo suficientemente elevado como para desaparecer la vegetación con la que tiene contacto, motivando la presente investigación.

En la actualidad, el método de tratamiento más conocido es la ósmosis inversa (OI), donde el agua pasa a través de una membrana semipermeable a presión y se produce un agua tratada de alta calidad. Este proceso de separación elimina material que va desde partículas en suspensión hasta moléculas orgánicas e incluso iones monovalentes de sal (Gregory et al., 2011b). Este proceso consume mucha energía haciendo que el tratamiento del agua de producción con OI se considere económicamente inviable en la mayoría de los casos.

Por otra parte, las sales se encuentran naturalmente en muchos suelos debido al material parental de origen y son un componente común en la mayoría de las corrientes contaminantes. Las sales predominantes en la mayoría de los suelos incluyen sodio, calcio, magnesio, cloruro y sulfato y en menor cantidad potasio, bicarbonato, carbonato y nitrato. Sin embargo, los aportes de sal al suelo pueden ocurrir también por la adición de desechos, aplicaciones de fertilizantes, precipitación y riego, o vertimientos de agua residual doméstica o industrial (Delleur, 2008)

En la naturaleza el cloro nunca se encuentra libre, se encuentra comúnmente como cloruro de sodio (NaCl), este compuesto es altamente soluble en agua, en la cual ellos persisten en forma disociada como aniones de cloruro con sus correspondientes cationes. Cuando se presenta salinidad excesiva de iones específicos como el sodio, los cloruros y el boro son tóxicos a algunos cultivos, perjudicando las cosechas y generando problemas de permeabilidad del suelo (Sierra Ramírez, 2011).

2.2. Biocarbonizados

Se denomina biocarbonizado o biochar al producto de la carbonización de biomasa a media o alta temperatura en ausencia de oxígeno. Este proceso se conoce como pirólisis y cambia la estructura química y física de dicha biomasa, para obtener un producto de textura fina, área superficial específica alta, y diferentes propiedades de acuerdo con las condiciones de obtención (Kambo and Dutta, 2015).

Los BC han tenido a lo largo del tiempo muchas aplicaciones en los suelos, ya que se han evidenciado mejoras en las propiedades físico-químicas y biológicas de los suelos, aumento del pH del suelo, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) (Safaei Khorram et al., 2015), mejora la capacidad de retención de agua en el suelo aumenta con el aumento de carbono orgánico, debido a la combinación de su porosidad y funcionalidad superficial (Ahmad et al., 2014). La adición de BC a suelos poco fértiles ha evidenciado el aumento de la capacidad de retención de fósforo (P) y la disminución en la lixiviación de nitrógeno (N) (Zhang et al., 2018). También, se han encontrado evidencias que la adición de BC contribuye a la biodisponibilidad del nitrógeno en los suelos agrícolas disminuyendo la demanda de fertilizantes nitrogenados, para el crecimiento de los cultivos (Gómez et al., 2016)

Ahora bien, los BC están emergiendo como mejoradores del suelo para reducir la biodisponibilidad de contaminantes en el medio ambiente, adsorción y / o el secuestro de pesticidas o sus metabolitos, con beneficios adicionales de la fertilización del suelo y la mitigación del cambio climático (Ahmad et al., 2014), ha sido reconocido también como uno de los adsorbentes más populares, ampliamente utilizados en tratamientos de agua y aguas residuales.

Se desea aprovechar la capacidad que tienen los carbones de adsorber diferentes especies de distinta naturaleza, gracias a la presencia de una variedad de grupos funcionales polares, principalmente los que contienen oxígeno, como ácidos carboxílicos, lactonas, hidroxilos (o fenoles) y carbonilos. Los grupos funcionales oxigenados en la superficie del carbón activado se protonan para crear una superficie positiva, que promueve la absorción electrostática, evidenciado en el estudio (Sun et al., 2017) donde, debido a las fuerzas electrostáticas, el átomo de H cargado positivamente atrae iones cloruros y forma enlaces de hidrógeno.

2.3. Propiedades Físicas y Químicas de los suelos

En esta sección se introducen los términos y ecuaciones de las propiedades físicas que relacionan al suelo con los modelos de flujo y transporte que son enunciados más adelante, y las propiedades químicas que intervienen en el movimiento del agua y transporte reactivo de solutos.

2.3.1. Propiedades Físicas

Se inicia por la definición de suelo, como un cuerpo natural que está compuesto por tres fases, sólida (minerales y materia orgánica), líquida (agua) y gaseosa (aire), que se encuentran en la superficie de la tierra, que ocupa un espacio y que se caracteriza por uno o ambos de los siguientes: horizontes o capas que se distinguen del material inicial como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia o por la habilidad de soportar plantas en un ambiente natural (Soil Survey Staff, 1999).

La parte sólida del suelo se puede dividir en dos, la parte activa e inactiva en donde la inactiva se encuentra constituida con los materiales minerales que sirven de esqueleto al suelo, son generalmente materiales minerales gruesos o medianos mayores que 2mm como piedras, cascajo y gravilla; la parte sólida activa está compuesta de materiales minerales y orgánicos de tamaño menor que 2 mm que es lo que se considera suelo y que tiene una naturaleza coloidal es decir partículas menores que 0.002 mm (arcillas), donde se retienen e intercambian

iones y ocupa la mayor parte del volumen total del suelo en promedio un 50 % (Castro, 1998).

Por otro lado, se encuentran las fases líquida y gaseosa, donde el agua que hace parte de fase líquida se encuentra en cantidades variables dentro del suelo y gracias a estas cantidades los elementos minerales se encuentran en el suelo como una solución dentro del mismo ocupando en promedio el 25 % del volumen total del suelo, albergándose en los mesoporos y microporos, mientras que los macroporos se permiten tanto el flujo o movimiento del agua como la aireación del suelo que hace parte de la fase gaseosa y ocupa en promedio el 25 % del volumen total restante del suelo.

Las características físicas de los suelos se describen mediante variables que se calculan por medio de las relaciones entre masa y volumen de cada fase, como se observa en la Figura 2-1.

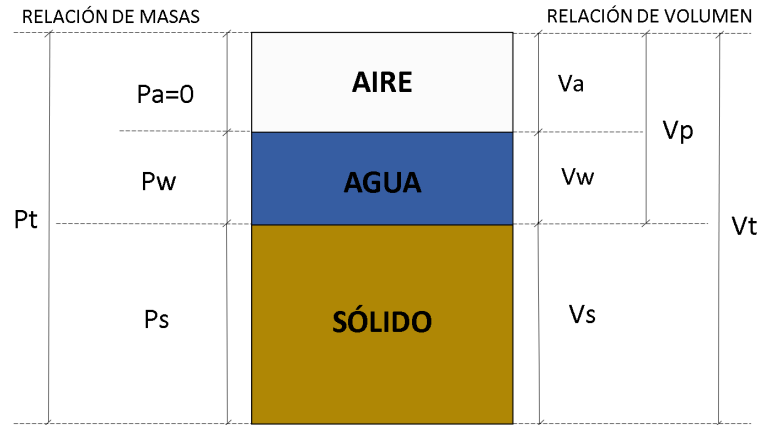


Figura 2-1: Diagrama esquemático considerando el suelo como un sistema trifásico. basado y modificado de (Jaramillo, 2002) y (LIMA, 2003)

Donde V_a , V_w , V_s que representan los volúmenes de la parte gaseosa, líquida y sólida respectivamente. V_p el volumen de poros (V_a+V_s) y V_t el volumen total que es igual a la sumatoria de V_a , V_w y V_s ($V_a+V_w+V_s$); P_a como parámetro de la relación de masas, que sería la masa de la fase gaseosa que se puede considerar igual a cero, P_w y P_s representan la masa de la fase líquida y sólida respectivamente. La densidad de las partículas (densidad real) que se encuentran en la fase sólida se describe con la ecuación 2-1:

$$\rho_r = \frac{P_s}{V_s}, \quad (2-1)$$

la densidad aparente a diferencia de la densidad real tiene en cuenta la organización de las fases (estructura), como se observa en la ecuación 2-2

$$\rho_a = \frac{P_s}{V_t} = \frac{P_s}{V_s + V_p} = \frac{P_s}{V_a + V_w + V_s} \quad (2-2)$$

La relación de volumen de poros o espacio poroso, esta dada en la ecuación 2-3

$$\eta = \frac{V_p}{V_t} * 100 = \frac{V_t - V_s}{V_t} * 100, \quad (2-3)$$

y la fracción líquida o el contenido de humedad en el suelo se puede expresar como el contenido de humedad gravimétrica, de acuerdo con la ecuación 2-4

$$W = \frac{P_w}{P_s}, \quad (2-4)$$

esta medida es adimensional ($g * g^{-1}$) y no se debe confundir con la humedad volumétrica mostrada en la ecuación 2-5

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} = W * \rho_a \quad (2-5)$$

2.3.2. Propiedades Químicas

Las características químicas de los suelos se reflejan en parámetros tales como la acidez representada por el pH, las propiedades estructurales determinadas por el contenido de carbono orgánico total y la capacidad de intercambio catiónico

pH en el suelo

Cuando se habla de reacción en el suelo se hace referencia a la acidez (capacidad de ceder protones) o alcalinidad (capacidad para recibir protones) del suelo o un horizonte, que se puede referir en un valor de pH que varía de 3.0 (suelos ácidos) a 12 (suelos alcalinos); suelos con pH ácidos pueden sufrir problemas de toxicidad por aluminio y suelos con pH muy alcalinos pueden tener problemas de salinidad y/o sodicidad.

algunos de los problemas que puede generar pH ácidos o alcalinos, se puede observar en la parte física de los suelos en la estructura, porosidad, aireación, la infiltración y la conductividad hidráulica; en las propiedades químicas se ve afectado la movilidad de elementos tóxicos como Al, Mn y metales pesados, hay menor disponibilidad de elementos como Ca, Mg, Mo; los procesos de adsorción de aniones como fosfatos, sulfatos, cloruros también se puede ver afectado por el pH o las interacciones químicas que ocurre en el sistema del suelo. (Porta Casanellas et al., 1994)

Elementos químicos en el suelo

Los elementos presentes en el suelo puede ocupar distintas posiciones, si se considera la fase solida, estos elementos pueden estar en una red cristalina desde que se formo el mineral y a medida que los procesos de meteorización intervienen en menor o mayor grado permiten que elementos salgan de la red, lo cual generaría que la red de cristales colapse y con ello a la desintegración mineral.

En la fase liquida del suelo los elementos se pueden encontrar en forma de solución, así como también partículas solidas en suspensión; los iones al momento de que el suelo alcance el punto de marchites permanente se precipitan en el suelo y al añadir agua vuelven a disolverse; cuando el ion reacciona con agua se le conoce hidratación y como resultado de este proceso, algunas moléculas de agua quedan rodeando a cada ión, lo cual el radio del ion hidratado es considerablemente mayor que el mismo ión deshidratado, afectando las reacciones de superficie ya que el ión hidratado estaría mas alejado de la superficie de tal modo que el grado de unión se reduce.(Porta Casanellas et al., 1994).

Por ultimo se encuentra la interfase sólido-liquida en donde los elementos están localizados en las superficies de determinadas partículas y en sus áreas de influencia se presentan las reacciones de superficies con uniones de distintos tipos (físicos o químicos) entre el elemento y la superficie.

Fenómenos de adsorción

La adsorción es la asociación de la materia por medio de las superficies de los solidos, lo cual permite que las concentraciones de las sustancias disueltas varíen según las diferencias en las proximidades de las partículas en el agua. Las fuerzas que pueden estar implicadas en la asociaciones de átomos, moléculas o iones pueden ser físicas como las fuerzas de Van der Waals o fuerzas de enlaces por puentes de hidrógeno; o químicas por medio de los enlaces iónicos o enlaces covalentes(Porta Casanellas et al., 1994).

Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) es la capacidad que puede tener un suelo de adsorber cationes y es equivalente a la carga negativa del suelo, la cual se presenta en los coloides del suelo, en este caso las arcillas y/o materia orgánica, debido a que la superficie especifica en donde se pueden ubicar las cargas de los coloides tiene función directa con el tamaño de partícula, donde la materia orgánica tiene mayor capacidad de adsorber iones pero esta capacidad que tiene la parte orgánica del suelo es muy variable ya que depende altamente del grado de la descomposición de la materia orgánica (Jaramillo, 2002).

Capacidad de intercambio Aniónico

La capacidad de intercambio aniónico (CIA) hace referencia a la cantidad de carga positiva en el suelo y su capacidad de poder adsorber aniones, aunque la CIA se presenta con menor frecuencia que la CIC, debido a que es una capacidad importante en suelos desarrollados a partir de materiales volcánicos (Andisoles) o suelos ácidos de zonas tropicales, como los suelos de los llanos orientales donde se presentan suelos con grandes cantidades de óxidos de aluminio y hierro y a su vez con arcillas de tipo caolinitica que con sus pH ácidos pueden presentar cargas eléctricas positivas, desarrollándola en los bordes de las partículas de arcillas (Jaramillo, 2002). Este tipo de intercambio de iones es un proceso importante en suelos con problemas de contaminación puesto que algunos metales pesados como el Cr, As, entre otros se presentan en forma aniónicas en el suelo.

2.4. Flujo y transporte en la zona no saturada

En esta sección se describen los modelos mas usados para estudiar el movimiento del agua y transporte de solutos en los suelos en la zona no saturada (ZNS) o vadosa, la cual está definida como la porción de suelo que se encuentra entre la superficie del suelo y el nivel freático, y es de gran interés con fines ambientales, agroindustriales o civiles (Szymkiewicz, 2013). Se muestran las curvas de retención de humedad, conductividad hidráulica saturada, no saturada, los parámetros y fenómenos de transporte en el suelo cuándo es impactado con el vertimiento de una sustancia ajena a su naturaleza. Cabe resaltar que, esta zona presenta una mayor complejidad, debido a que todos sus parámetros van en función de un contenido de humedad, y de los cambios de las propiedades físico-químicas del suelo, mientras que en la zona saturada es un valor escalar promedio.

2.4.1. Movimiento del agua en el suelo

Para dar inicio a las ecuaciones que explican el movimiento del agua en el suelo, se hace necesario identificar la escala de trabajo en la cual se va a llevar a cabo la investigación. Teniendo en cuenta que la escala del tamaño de poro no es adecuada para problemas prácticos (Szymkiewicz, 2013), y que no se quiere llevar a cabo una experimentación en campo en una gran extensión donde la heterogeneidad del suelo juegue un papel importante, la escala de Darcy es la más apropiada para el estudio de columnas inalteradas de suelo a escala laboratorio y se define una sola dimensión por la misma razón.

Dicha escala tomó este nombre debido a la investigación que desarrolló Henry Darcy en 1856, donde definió la conductividad hidráulica como la facilidad con la que el agua puede viajar a través de los poros del suelo como se observa en la ecuación 2-6;

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2-6)$$

donde q es la velocidad de flujo de Darcy, K es la conductividad hidráulica, $(\frac{\partial h}{\partial z})$ es el gradiente hidráulico, y A es el área o superficie de contacto. Sin embargo, en 1907, Buckingham, modificó la anterior ecuación con el fin de describir el flujo de agua en un medio poroso no saturado, en función del contenido de humedad volumétrico θ , como se describe en la ecuación 2-7;

$$q = \frac{Q}{A} = -K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2-7)$$

luego, en 1931, Richards combino la ecuación de continuidad, que expresa el principio de conservación de la masa de agua contenida en un volumen elemental representativo de suelo (LIMA, 2003) con la anterior ecuación 2-7, obteniendo 2-8

$$C \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (2-8)$$

donde h es la carga de succión del suelo, t es el tiempo, z es la profundidad y C es la constante de capacidad de agua del suelo dada por la pendiente de la curva de retención de agua en el suelo.

Las curvas de retención de humedad (CRH) y curvas de conductividad hidráulica (CCH) han sido estudiadas y analizadas para la obtención de relaciones funcionales y caracterización los parámetros de transporte de la zona vadosa, dentro de las cuales, la ecuación empírica más implementada es la de van Genuchten, 1980 (van Genuchten, 1980), como se observa en la ecuación 2-9

$$S_e = \frac{1}{((1 + (\alpha h)^n)^m)} \quad (2-9)$$

$$K_r(S_e) = S_e^{1/2} [1 - (1 + (S_e)^{1/m})^m]^2 \quad (2-10)$$

Donde la saturación efectiva $S_e = (\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$, θ_r es la saturación residual, θ_s es la máxima saturación; α es un parámetro de ajuste de la curva, inverso a la presión de entrada de aire; n es la distribución del tamaño de poros; m es otro parámetro de ajuste de la curva y está definido como $m = 1 - 1/n$. De la ecuación 2-10, K_r es la conductividad relativa, expresada como la relación $K_r = K/K_s$, K es la conductividad hidráulica para

cualquier contenido de humedad y K_s es la conductividad hidráulica para el medio saturado.

La ecuación 2-11 fue desarrollada en 1964 por Brook y Corey (van Genuchten et al., 1991a), conocida como la ecuación BC, donde λ es el parámetro de distribución del tamaño de poro y los demás parámetros coinciden con la ecuación 2-9

$$\theta = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r)(\alpha h)^{-\lambda} & h > 1 \\ \theta_s & h \leq 1 \end{cases} \quad (2-11)$$

Por otra parte, el modelo de Burdine en 1953, proviene de un desarrollo matemático a partir de la suposición de un modelo para la distribución de tamaños de poros del suelo para predecir la conductividad hidráulica relativa. En 1980, Van Genuchten propuso una modificación a este modelo a partir de una modelación de la curva de retención de humedad (Fredlund et al., 2011), dada en la ecuación 2-12.

$$K(S_e) = K_s S_e \frac{g(S_e)}{g(l)} S_e = \int_0^{S_e} \frac{l}{(h(z))^2} dz \quad (2-12)$$

donde se introduce el término l el cual es un parámetro estimado de conectividad de poros, que normalmente se toma como 0,5 para la mayoría de los suelos. Luego, en 1976, Mualem evoluciona la ecuación de Burdine para facilitar la integración, como se observa en la ecuación 2-13

$$K(S_e) = K_s S_e \left(\frac{g(S_e)}{g(l)} \right)^2 \quad (2-13)$$

$$S_e = \int_0^{S_e} \frac{l}{h(z)} dz \quad (2-14)$$

Infiltración en campo

Kostiakov en 1932 propuso la ecuación empírica simplificada 2-15, que en la actualidad sigue siendo la más usada en la agricultura con fines de cálculos de láminas de riego y tiempos del mismo, volúmenes de escorrentías y en general balances del ciclo hidrológico (Delleur, 2008). Donde i , es la infiltración acumulada (cm); t es el tiempo de infiltración (min); a es el coeficiente de velocidad de infiltración y b es un parámetro adimensional (0 - 1).

$$i = a * t^b \quad (2-15)$$

Si se integra a ecuación 2-15 se obtiene la velocidad de infiltración, donde 60 es el factor de conversión para tener la velocidad en (cm/h)

$$I = \frac{di}{dt} = 60 * a * b * t^{b-1} \quad (2-16)$$

Para obtener la infiltración básica se hace necesario conocer cuando la infiltración se mantiene constante o cuando la velocidad de cambio de entrada para un periodo estandar es 10 % o menos de su valor (Orjuela-Matta et al., 2010) como se observa;

$$\frac{dI}{dt} = -0,1 * I \quad (2-17)$$

Aplicando la ecuación 2-16 en 2-17 y despejando, se obtiene el tiempo básico

$$t_{básico} = -600 * (b - 1) \quad (2-18)$$

Este tiempo se reemplaza en la ecuación 2-16 para finalmente obtener la infiltración básica, la cual es un insumo para el modelo de HYDRUS de flujo del cual se hablará posteriormente.

$$I_{básica} = \frac{di}{dt} = 60 * a * b * t_{básico}^{b-1} \quad (2-19)$$

Conductividad hidráulica en campo

La expresión para calcular Ks por el método de Porchet, se deduce de la ecuación 2-6, donde A en este caso es el área o superficie de contacto representada en la ecuación 2-20.

Derivando el caudal con respecto a t , y el área respecto a y , se encuentra la ecuación 2-20 donde y es la profundidad del orificio hecho con el barreno.

$$\frac{dQ}{dt} = \pi r^2 dy \quad (2-20)$$

$$A = \pi r^2 + 2\pi r y \quad (2-21)$$

$$\pi r^2 dy = -K(\pi r^2 + 2\pi r y) dt \quad (2-22)$$

Despejando la conductividad, para cada momento se obtiene la ecuación 2-23 (Porta Casanellas et al., 1994), donde se reemplazan los valores de t por los tiempos tomados en campo y y por las profundidades del agua en el respectivo tiempo.

$$K = \frac{r}{2(t_{i+1} - t_i)} * \ln \frac{y_i + \frac{r}{2}}{y_{i+1} + \frac{r}{2}} \quad (2-23)$$

2.4.2. Transporte de solutos

Siguiendo con la descripción de las ecuaciones anteriormente mencionadas, se quiere abordar la ecuación que explica el trassporte de solutos en medios porosos, denominada ecuación CDE por sus siglas en inglés *convective-dispersive equation* la cual está compuesta por tres tipos de transporte que serán descritos brevemente a continuación;

El transporte convectivo (J_m) es el movimiento de un soluto disuelto en el agua (Wilson et al., 1995), teniendo en cuenta la escala de esta investigación se muestran la ecuaciones en una dirección 2-24, desarrollada por van Genuchten y Wierenga en 1986 (van Genuchten and W. J. Alves, 1984)

$$J_m = q.C \quad (2-24)$$

Donde q es la velocidad de Darcy expuesta en la ecuación 2-6 y C es la concentración de la solución. Adicional a lo anterior, se encuentra el transporte difusivo (J_D), el cual resulta del movimiento térmico natural de iones y moléculas disueltos y se describe con la ley de difusión de Fick (Wilson et al., 1995) como se observa en la ecuación 2-25

$$J_D = -\theta D_m \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2-25)$$

El nuevo término D_m es el coeficiente de difusión del medio poroso, que siempre es menor que el coeficiente de difusión en agua (Wilson et al., 1995) debida a la tortuosidad del medio poroso expuesta anteriormente.

Teniendo en cuenta que la velocidades que se pueden presentar cerca a las paredes o en el centro de los poros, son diferentes, esto hace que el soluto también se transporte a diferente velocidad (Tindall et al., 1988) denominado transporte dispersivo (J_h) y (D_h) es el coeficiente de la dispersión mecánica que está relacionado directamente con la velocidad, como se observa en la ecuación 2-26

$$J_h = -\theta D_h \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2-26)$$

$$D_h = \alpha v \quad (2-27)$$

Teniendo en cuenta la escala de Darcy, los valores de (D_m) y (D_h) son macroscópicamente similares y pueden ser calculados en conjunto dando origen al coeficiente de dispersión hidrodinámica longitudinal (Wilson et al., 1995) de la siguiente forma $D = D_m + D_h$. Combinando las ecuaciones anteriores, se tiene el flujo de solutos (J_s) 2-28

$$J_s = -\theta D \frac{\partial C}{\partial z} + q.C \quad (2-28)$$

Esta ecuación combinada con la ecuación de continuidad y agregando el termino del tiempo t , se obtiene la ecuación general de solutos que no se adsorben, como se observa en la ecuación 2-29

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left((\theta D \frac{\partial C}{\partial z}) - q.C \right) \quad (2-29)$$

Sin embargo, en la realidad, los solutos son normalmente adsorbidos por el medio poroso en un porcentaje y otra parte queda libre en la solución, para lo cual se desarrolla la ecuación 2-30 también utilizada para las isotermas de adsorción

$$S = K_f C^n \quad (2-30)$$

Donde S es la concentración adsorbida y C es la concentración de la solución, K_f es el coeficiente de partición de Freundlich y n es un parámetro adimensional, que en muchos casos se puede suponer como 1 (Wilson et al., 1995), convirtiéndose en una ecuación lineal; esta ecuación introduce el término de coeficiente de retardo R , descrita en la ecuación 2-31, donde ρ es la densidad aparente del suelo

$$R = 1 + \frac{\rho K_f}{\theta} \quad (2-31)$$

Una vez enunciados los anteriores parámetros se puede introducir la ecuación CDE enunciada anteriormente, como la que explica o describe los fenómenos de flujo y transporte de solutos o contaminantes en el suelo. 2-32, donde v es la velocidad de poros definida como q/θ .

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R} \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{v}{R} \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2-32)$$

Una vez planteados los conceptos principales sobre los cuales se sustentan los antecedentes y los parámetros que permiten dar solución al problema de investigación, a continuación se expone la metodología, con la cual se llevo a cabo la experimentación y el procesamiento de los datos para la obtención de información dirigida a la solución de la hipótesis planteada.

3 Metodología

En este capítulo se expone como se desarrolló el proceso investigativo, para lo cual se divide en tres secciones; muestreo en campo, donde se expone la metodología usada para la extracción de las columnas inalteradas de suelo; pruebas de laboratorio, donde se enuncia la metodología implementada para la caracterización físico-química del suelo y biocarbonizados y la obtención experimental de parámetros de flujo y transporte; modelación numérica, donde se explican los principios que utilizan los diferentes software para la obtención de parámetros y simulación de escenarios, como se expone a continuación;

3.1. Muestreo en campo

En esta sección se describe el proceso de selección del suelo modal de la zona de estudio, la descripción edafológica en calicata, la forma en la cual se obtuvieron las columnas inalteradas de suelo y las prueba in-situ de infiltración y conductividad hidráulica.

3.1.1. Selección del suelo testigo

Para desarrollar la experimentación de los efectos del biocarbonizado en un suelo regado con agua de producción de hidrocarburos, se contó con el apoyo del Señor Cesar Paredes, propietario de la finca La Rusia, ubicada en el municipio de Puerto Gaitán, en el departamento del Meta como se observa en la figura **3-1**. Finca en la cual se quiere llevar a cabo el desarrollo de una parcela demostrativa y de investigación, para evaluar el impacto de regar cultivos con agua de producción de hidrocarburos, debido a la escasez de agua en las temporadas secas de dicha zona, considerando el denominado *tercer uso del agua de producción (3uA)* propuesto por ACIPET (Asociación colombiana de Ingenieros de Petróleos) para regar un posible cultivo agroindustrial.

Delimitación de la zona de estudio

Para determinar el sitio de muestreo del suelo, se hizo necesario reconocer la zona de estudio, para lo cual se realizó una recopilación de la información con la cual cuenta la finca la Rusia. Se contó con un estudio de geoelectrica con dos puntos georreferenciados, generando

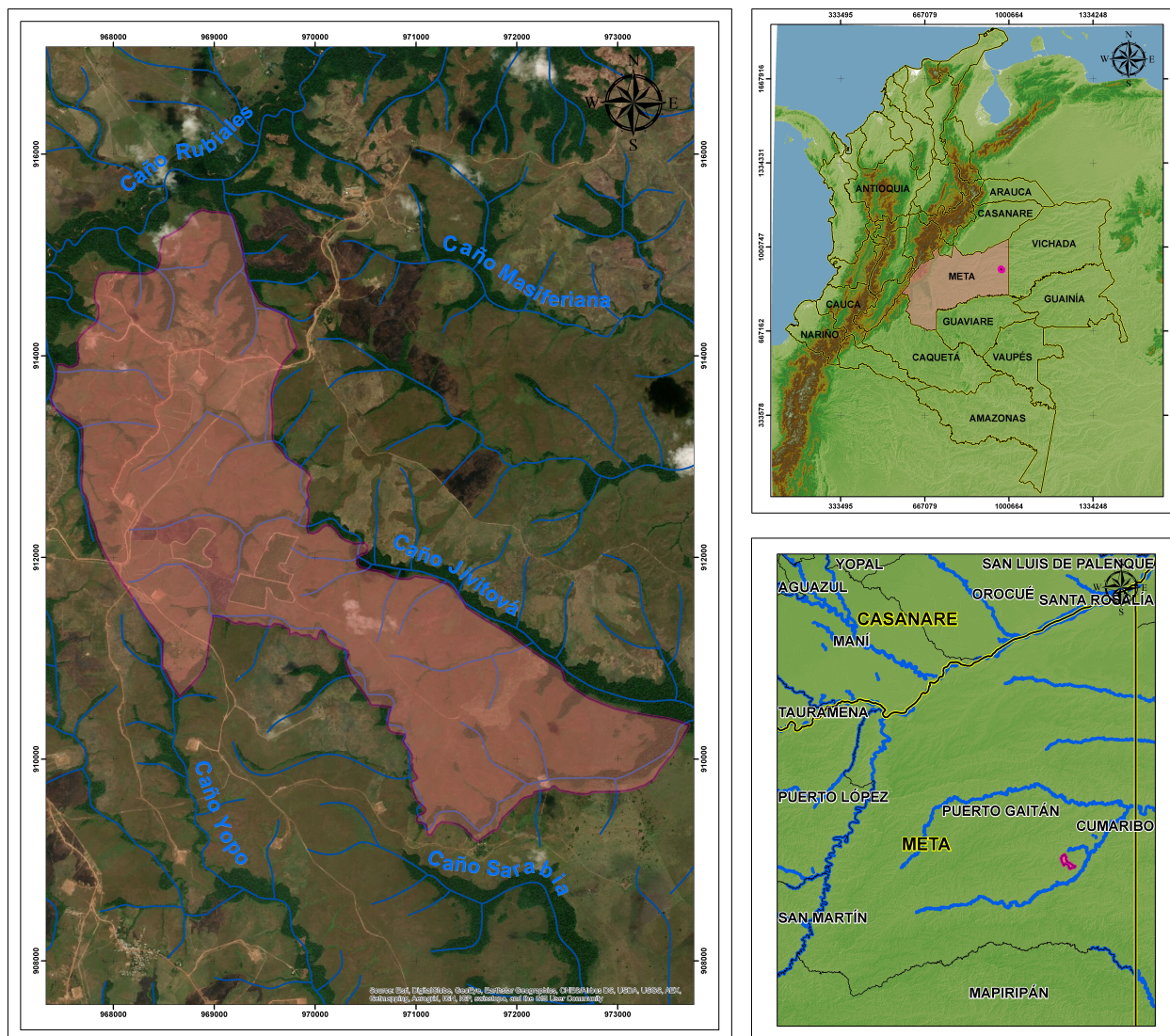


Figura 3-1: Ubicación espacial de la zona de estudio

una idea de la zona más productiva de la finca. Adicional a lo anterior se traslapó la información con el estudio general de suelos a escala 1:100.000 en el cual se observó que los puntos se encuentran sobre un mismo tipo de suelo, y que éste es el que mayor área tenía en el polígono de la finca. Sin embargo, es importante recalcar que la heterogeneidad de los suelos es relevante, más aún, cuando se trabaja con una escala tan general como la 1:100.000.

Como se observa en la figura **3-2**, el suelo dominante es de orden oxisol que puede estar en dos regímenes de humedad, el ústico (seco) o údico (húmedo) de acuerdo a variables climáticas y de almacenamiento de agua en el suelo. Su nombre taxonómico es Typic Haplustoxs o hapludoxs, dependiendo del régimen de humedad del suelo, representado en el mapa por el color rojo. Estos suelos son conocidos por ser evolucionados, antiguos, lavados, con pH ácido, de baja fertilidad, normalmente de colores rojizos, texturas francas a finas, baja capacidad de retención de agua y capacidad de intercambio catiónico muy bajas, condiciones que fueron relevantes en el modelamiento de flujo y transporte de cloruros.

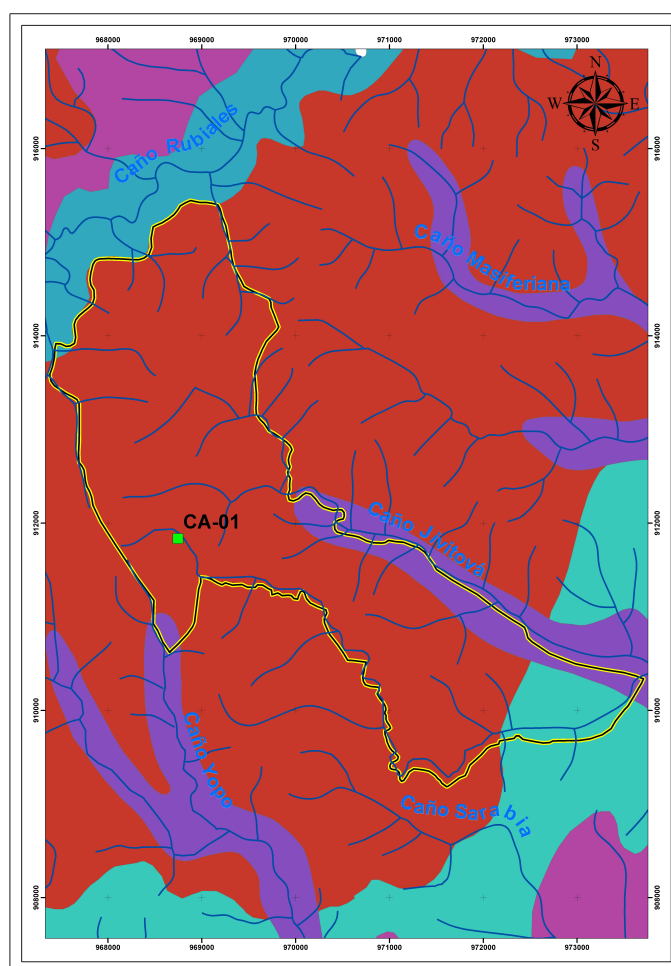


Figura 3-2: Mapa de suelos de la finca La Rusia

Adicionalmente, del estudio de suelos se pudo extraer información complementaria, donde se enuncian algunos de los factores formadores de este tipo de suelo como el material parental de arcillolitas y conglomerados; el clima cálido, seco con temperaturas mayores a 24 °C y precipitaciones entre 1000 y 2000 mm por año, y otros componentes que definen las limitaciones y capacidad de uso del suelo (IGAC, 2014).

Una vez escogido el suelo modal en la finca en el lugar definido como CA-01, como se observa en la figura 3-2, se caracterizó el mismo, para lo cual se realizó una calicata, la cual es una excavación de 1.50 m de largo, 1.2 m de ancho y 1.2 m de profundo, en la cual se describió el suelo y sus capas u horizontes como se puede ver en la figura 3-3, se extrajeron de cada horizonte muestras de suelo en bolsas de 1 kg (por triplicado), que fueron llevadas al laboratorio para su análisis físico y químico.



Figura 3-3: Calicata CA-01

Luego, se procedió a la extracción de la columna de suelo inalterada (monolito tubular) teniendo en cuenta la metodología desarrollada por (Jarvis et al.,), para grandes monolitos de suelo no perturbados encapsulados en tuberías de PVC. Se hace la aclaración que en Colombia aún no existe una metodología para llevar a cabo este procedimiento, por lo que se usó el reportado en otros países, ajustándolo a las necesidades y disponibilidad de material y maquinaria con la que se contó.

Para la extracción de monolitos tubulares se utilizó un tubo de 6" de diámetro y RDE (relación diámetro espesor) considerable para que soportara los esfuerzos, dicho tubo tenía un lado biselado para que cortara más fácilmente el suelo y pudiera profundizar. Se colocó sobre la cara descrita de la calicata; se limpió la superficie del suelo con la pala o palín para evitar que el material vegetal y raíces dificultaran la entrada. Se enterró el tubo verticalmente, evitando su inclinación, para esto se colocó un trozo de madera grueso encima para proteger el tubo y se golpeó hasta enterrarlo aproximadamente unos 40 cm con un mazo pesado para aprovechar la gravedad e impactarlo el menor número de veces posible.



Figura 3-4: Monolitos tubulares

Este procedimiento se repitió con los 10 tubos de 6" de diámetro y 40 cm de altura en lugares cercanos a la primera muestra para que la variabilidad espacial del suelo no afectara significativamente las mediciones que se llevaron a cabo posteriormente en el laboratorio.

Infiltración de campo

Tratando de evitar la variabilidad espacial del suelo, se realizaron las pruebas de infiltración y conductividad hidráulica saturada en las esquinas de la calicata a 2,5 m de distancia entre ensayos. Para medir la velocidad de infiltración en campo se sigue la metodología de Porta expuesta en (Porta Casanellas et al., 1994), implementando el método del infiltrómetro de doble anillo como se observa en la figura **3-5**, tomando datos del descenso de la lámina de agua cada minuto hasta los 10 minutos, luego cada 5 minutos hasta la media hora, y luego cada 15 minutos hasta las dos horas.



Figura 3-5: Prueba de infiltración en campo

Con el fin de conocer el comportamiento del agua en el suelo se hizo uso de las ecuaciones empíricas que describen este proceso, para lo cual se escogió el modelo de Kostiakov como el que mejor muestra un ajuste para oxisoles estudiado por Orjuela (Orjuela-Matta et al., 2010), mostrando valores de coeficiente de determinación (R^2) de 0,99 con las ecuaciones 2-17 y 2-19 descritas en el capítulo 2

Conductividad saturada de campo

La conductividad hidráulica (K_s) medida en campo se puede llevar a cabo por medio de dos métodos, dependiendo de la presencia y profundidad del nivel freático; por lo cual, para este caso se utilizó el Método de Porchet (Porta Casanellas et al., 1994) ya que no había nivel freático aparente para esa época del año, el cual consiste en hacer un orificio con el barreno, de diámetro y profundidad conocidas como se observa en la figura 3-6, se llena de agua y se toman las medidas de descenso del agua en el tiempo, como se ve en la figura 2-23. Se tomaron los datos al igual que las infiltraciones, cerca a la calicata en cada esquina, pero sin traslaparse con las otras pruebas.

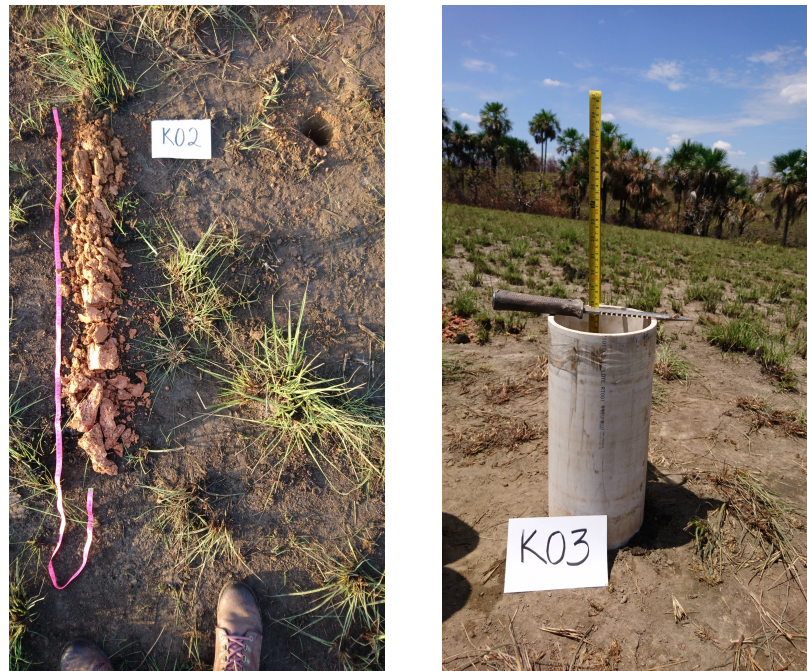


Figura 3-6: Prueba de conductividad hidráulica saturada en campo (K_s). Metodo Porchet.

Una vez obtenidos los datos, se hizo uso de las ecuaciones expuestas en el capítulo 2 para obtener la conductividad hidráulica

3.2. Pruebas de laboratorio

Para dar solución a los objetivos específicos de la presente investigación, se hizo necesaria la caracterización del suelo testigo de interés y la selección del biocarbonizado de acuerdo a características de retención de cloruros y su adecuada relación con el suelo, así como las pruebas para la obtención de los parámetros de flujo y transporte

3.2.1. Caracterización del suelo testigo

A continuación se expone la metodología implementada en las pruebas de laboratorio para la caracterización del suelo, teniendo en cuenta las propiedades físicas y químicas para su definición taxonómica.

1. Pruebas Físicas

Para determinar el porcentaje de arena, limo y arcilla (textura) se realizó por el método de pipeta en el laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)(IGAC, 2006), por otro lado, en el laboratorio de suelos y aguas de la Universidad Nacional se determinó la densidad aparente (D_a) y real (D_r), con la metodología de toma de muestra por el método del cilindro y por el método del picnómetro,

respectivamente. Adicionalmente, en estos mismos análisis se incluyeron las curvas de retención de humedad con el método de platos y ollas de presión con secado de muestras a 105 °C.

2. Pruebas Químicas

Las pruebas que se llevaron a cabo fueron en el laboratorio de aguas y suelos de la Universidad Nacional en la facultad de Agronomía fueron; elementos mayores (Ca, K, Mg, Na), pH, CICE, carbono orgánico (CO), Nitrógeno (N), aluminio intercambiable (AI) y fósforo (P). Se determinaron el **pH** por valoración potenciométrica según el método de suspensión suelo:agua (relación peso: volumen 1:1), **CO** por el método de análisis elemental, **N** total estimado a partir de la materia orgánica, **Ca, K, Mg y Na** por medio de extracción con acetato de NH_4 1M pH 7 con valoración de absorción atómica, **CICE** Capacidad de Intercambio Catiónico por medio de la estimación a partir de las bases intercambiables y valoración volumétrica. **AI** Acidez intercambiable por medio de la extracción con KCl 1M y valoración volumétrica. **P** Fósforo disponible con el método de Bray II y valoración colorimétrica.

3.2.2. Biocarbonizados y su caracterización

Los biocarbonizados utilizados en este trabajo fueron los siguientes; **biochar de retamo espinoso** (BCRet) el cual fue obtenido en el laboratorio de combustibles y energía de La Universidad Nacional de Colombia departamento de Química (LICE), **biochar de retamo espinoso modificado** (CARet) activado en el laboratorio de Ambiental y un **carbón activado de cuesco de palma** (CAC) obtenido de la empresa TECSOL. Estos materiales tienen las siguientes características;

1. BCRet: biocarbonizado preparado a partir de residuos forestales de retamo (BCRet) mediante carbonización a 370°C por 2 h; se molió y tamizó para obtener un tamaño de partícula 2mm.
2. CARet: Se realizó la activación química con ácido sulfúrico, para lo cual se siguió la metodología de Mr. M. Shanmugasundaram Mr.M.Shanmugasundaram quien asegura que la activación ácida hace que la superficie del carbón quede altamente protonada. Para lo cual se activaron 100 g de carbón sumergiéndolo en 1 L de ácido sulfúrico (H_2SO_4) (1 M), se agitó por media hora y luego se dejó en contacto por 16 hr, al cabo de ese tiempo se lavó con abundante agua des-ionizada y se secó a 60 °C por 18 hr.
3. CAC: Carbón activado térmicamente, biomasa de residuo de palmicultura (principalmente de cuesco de palma) provisto por la empresa TECSOL, se tamizó para obtener un tamaño de partícula 2 mm.

La caracterización de los materiales carbonosos se realizó por análisis elemental de carbono, hidrógeno y nitrógeno se realizó en un equipo Thermo Scientific CHNS-O Analyser Flash 2000, con una curva de calibración con BBOT Thermo Scientific; el contenido de oxígeno se calculó por diferencia. El análisis próximo (humedad, materia volátil y cenizas) se determinó en un equipo TGA/DSC 1 STARe System (Mettler Toledo) de acuerdo con la metodología descrita por Krzysztof et al. 2018, usando un flujo de 20 mL/min de nitrógeno Grado 5.0 y una velocidad de calentamiento de 10 °C/min desde 30 hasta 900 °C; posteriormente se enfrió hasta 500 °C y se cambió la atmósfera a aire enriquecido con oxígeno para obtener las cenizas calentando nuevamente a 10 °C/min hasta 800°C. El carbono fijo se determinó por diferencia.

El análisis por espectroscopía RAMAN de los biocarbonizados se llevó a cabo usando un microscopio dispersivo Raman HORiba Jobin Yvon LabRam (HR800) equipado con un láser verde (532 nm), y un detector CCD. Por otra parte, La determinación del pH se realizó bajo la norma ASTM D6851 y para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se usó el método propuesto en Munera-Echeverri et al., 2018.

3.2.3. Selección del biocarbonizado

Una vez obtenida la caracterización del suelo y los biocarbonizados, se inicia con las pruebas para su selección. Teniendo en cuenta que el cloruro se encuentra en el suelo y el agua como cloruro de sodio (NaCl), la experimentación se llevó a cabo de la siguiente manera.

Retención de cloruros

Para lograr el primer objetivo específico de la presente tesis se hizo necesario plantear una metodología que combinara la cuantificación de cloruros, un estudio por lotes (Batch) y la obtención de las isothermas de adsorción.

1. Determinación de cloruros (titulación argentométrica)

Para llevar a cabo la cuantificación de cloruros en solución, se sigue con la metodología del *Standard methods for the examination of water and waste water* (Rice et al., 2017) en el capítulo de titulación argentométrica. Iniciando por la elaboración del indicador de cromato de potasio (K_2CrO_4) disolviendo 25 g en 500 mL de agua des-ionizada (libre de Cl); luego se elaboró el titulante de nitrato de plata ($AgNO_3$), disolviendo 2,395 g de $AgNO_3$ en 1000 mL de agua des-ionizada (0,0141 M); adicionalmente se preparó un patrón de cloruro de sodio disolviendo 824,0 mg en 1000 mL (0,0141 M) para estandarizar el $AgNO_3$ con esta solución.

Una vez obtenidos los reactivos y los blancos, se tomaron 10.00 mL de la muestra a titular, se adicionó 1 mL de K_2CrO_4 y se ajustó el pH a 8 con bicarbonato de sodio $NaHCO_3$, se agitó manualmente mientras se realizaba la adición de $AgNO_3$ hasta que viraba el color, como se observa en la figura 3-7. Debido a que este método depende de la precisión para detectar el cambio de color de amarillo a amarillo rojizo, se realizó el procedimiento por triplicado para cada muestra.

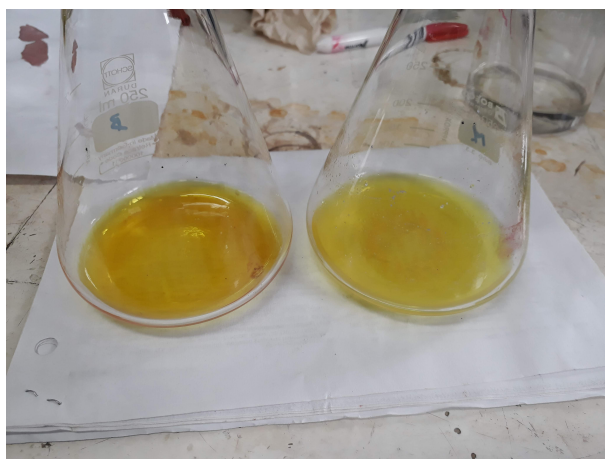


Figura 3-7: Titulación de cloruros con titulación argentométrica (cambio de color)

2. Estudio por lotes (Batch)

Los siguientes experimentos se realizaron basados en la metodología planteada por M. Shanmugasundaram Mr.M.Shanmugasundaram adecuándola para estudio de suelos y no tratamiento de aguas; de esta manera, se determinaron la influencia del tiempo de contacto y la concentración inicial de $NaCl$. Cabe resaltar que en este estudio no se varió el pH de la disolución, ya que a pesar de que se reportan mejores resultados en la retención de cloruros (Sun et al., 2017)(Mr.M.Shanmugasundaram, Dr.K.Sudalaimani, 2012), pH ácidos no son deseables para suelos agrícolas.

- **Constante de adsorción:** Sin tener en cuenta el tiempo de equilibrio de cada biocarbonizado, se agitó a 600 rpm una cantidad de 10 g de cada biocarbonizado con 100 mL de agua desionizada en un tiempo restringido de 1 hr (simulando condiciones normales de una precipitación), con una concentración de 1000 ppm de $NaCl$ y con la siguiente ecuación 3-1 se obtuvo la constante de adsorción (Mr.M.Shanmugasundaram, Dr.K.Sudalaimani, 2012)

$$q_e = \frac{(C_o - C_e).V}{m} \quad (3-1)$$

Donde q_e es la constante de adsorción para cada BC, C_o es la concentración inicial, C_e es la concentración en equilibrio al cabo de una hora, V es el volumen de la solución y m es la masa del adsorbente.

- **Inluencia del tiempo de contacto:** Se tomaron 10.00 g del biocarbonizado, se colocaron en un beaker de 250 ml y se adicionaron 100 mL de la disolución de NaCl (1000 ppm); esta mezcla se sometió a 400 rpm durante 1, 3 y 6 hr; luego se filtró al vacío con papel filtro Whatman de diámetro de 47 mm, y de la solución resultante se toman los 10,00 mL para la titulación argentométrica.
- **Influencia de la concentración inicial:** Se prepararon disoluciones de NaCl de las siguientes concentraciones; 10, 30, 50, 100, 200, 800 y 2280 mg/L (ppm). Para realizar el estudio por lotes, se pesaron 10.00 g de cada uno de los biocarbonizados y se pusieron en contacto con cada una de las disoluciones de NaCl preparadas, durante 1 hr a 400 rpm. Posteriormente se filtró al vacío con papel filtro Whatman de diámetro de 47 mm, y de la solución resultante se toman los 10,00 mL para la titulación argentométrica.

3. Isotermas de adsorción

En la agricultura y en procesos de tratamiento de aguas, normalmente se usan las isotermas de adsorción como una herramienta para evaluar retención de algún tipo de contaminante, en este caso, aunque el cloruro no sea definido como un contaminante (ya que no pone en riesgo la salud), si tiene impactos negativos en suelos con aptitud agrícola o agroindustrial.

Por lo cual, siguiendo la metodología de varios autores (Rossi, 2011)(Vargas et al., 2010)(Sánchez et al., 2019)(Mr.M.Shanmugasundaram, Dr.K.Sudalaimani, 2012), se elaboraron las isotermas de adsorción donde se representan los datos de la concentración adsorbida, en este caso de NaCl, frente a la concentración en equilibrio de la solución. Estas isotermas se ajustan a modelos matemáticos para obtener constantes que sirvan como parámetro de comparación; dentro de los cuales se nombran dos de los modelos más usados como lo son Langmuir y Freundlich, expresadas respectivamente con las ecuaciones 3-2 y 3-3.

$$\frac{C}{X} = \frac{C}{X_m} + \frac{1}{K * X_m} \quad (3-2)$$

$$X = k * C^{1/n} \text{ linealizando, } \log(X) = \log(a) + n\log(C) \quad (3-3)$$

Donde C es la concentración de NaCl en equilibrio, X es la cantidad de NaCl adsorbido sobre la masa del adsorbente (mol/g), X_m es la máxima adsorción de NaCl (mol/g),

K es una constante relacionada con la energía de enlace, k es una medida del área superficial del adsorbente, a es el coeficiente de adsorción de NaCl y $1/n$ es un indicador de la energía de adsorción (C. LÓPEZ-MATEO, E. ÁLVAREZ, 2005). A partir de los anteriores parámetros a y n se obtiene la capacidad de adsorción del adsorbente K_d , para el biocarbonizado y cada uno de los horizontes del suelo (Sánchez et al., 2019) según la ecuación. 3-4

$$Kd = a * C^{n-1} \quad (3-4)$$

3.2.4. Parámetros de flujo

Para dar solución al segundo objetivo específico se hizo necesario encontrar los parámetros principales de flujo en el suelo testigo, para esto se llevó a cabo unas pruebas en campo y otras en el laboratorio obteniendo parámetros de entrada del tercer objetivo específico en el modelo de flujo y transporte.

Conductividad saturada en laboratorio

Debido a que el modelo del cual se va a tratar en el siguiente ítem trata cada horizonte con su información propia, se hace necesario obtener los parámetros de conductividad saturada y curvas de retención de humedad para cada una de las capas u horizontes del suelo testigo; luego de lo cual, se repiten los ensayos con el suelo del primer horizonte adicionando el bio-carbonizado en una relación del 10 % en peso, para su posterior comparación.

De las columnas inalteradas de suelo de 6" de diámetro y 40 cm de altura, se tomaron tres para tomar mediciones de cada uno de los tres horizontes por triplicado, cortándolos a los 17 cm para cada horizonte y hacer los ensayos por separado, siguiendo la metodología de descrita en (IGAC, 2006), mediante el ensayo de permeámetro de carga constante. Las muestras se dejaron en contacto con agua en su parte inferior cuatro semanas hasta que se saturaron por capilaridad y se realizó un montaje como se observa en la figura 3-8 para hacer percolar agua manteniendo la carga hidráulica, lo cual se logró con la bomba peristáltica, donde primero se buscó la velocidad de la misma en la cual la lámina se mantuviera constante durante el tiempo que duró cada ensayo, teniendo la precaución que fuera lo suficientemente baja como para ser perceptible, pero que no representara mayor altura para definir despreciable esa diferencia y asumir gradiente hidráulico unitario. De igual forma se realizó la prueba para las columnas

Teniendo en cuenta que la conductividad hidráulica es la propiedad del suelo que mide la facilidad con la que el agua o fluido puede viajar a través de sus poros en diferentes direcciones (Delleur, 2008), debido a las dimensiones de los monolitos, se tiene como finalidad determinar el flujo vertical para lo cual se imitó el ensayo de Darcy para implementar la ecuación 3-5;

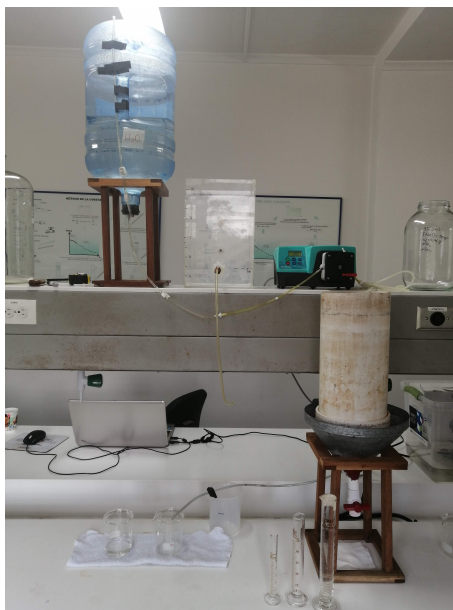


Figura 3-8: Montaje Conductividad saturada en laboratorio

conociendo que $Q = V/t$ se reemplaza en la misma ecuación y se despeja K como se observa en la ecuación 3-5.

$$K = \frac{V * L}{\Delta H * A * t} \quad (3-5)$$

Donde V es el volumen de fluido saliente de la columna medido en la prueba para cada tiempo t , A es el área de la sección transversal de la muestra en este caso del tubo y $\Delta H = (a + L)/L$ donde a es la lámina de agua constante y en este caso despreciable y L longitud de la muestra, por lo tanto $\Delta H = 1$. Para el caso de este ensayo, se tomaron los volúmenes de agua saliente de la columna de suelo cada 5 min hasta los 15 min y luego cada 15 min hasta asegurar que se había alcanzado el estado estacionario del sistema.

Curvas de retención de humedad

Este ensayo se llevó a cabo en el laboratorio de aguas y suelos de la facultad de agronomía de la Universidad Nacional de Colombia, por medio del método de plato y ollas de tensión y secado a 105°C. para 5 puntos (0.3, 1, 5, 10, 15 bares) como se especifica en el libro de Métodos Analíticos del laboratorio del IGAC (IGAC, 2006). Esta prueba se lleva a cabo para cada horizonte y para el primer horizonte combinado con el biocarbonizado, todos por triplicado para promediar si no habían datos atípicos.

Conductividad hidráulica no saturada

Se llevó a cabo la metodología del aire caliente, sin embargo, al tener gravilla la muestra, presentó problemas para realizar los cortes finos de la muestra que se debían realizar mien-

tras se le aplicaba calor a uno de los extremos de la muestra inalterada, ya que el tamaño de la gravilla hacía que se disgregara el suelo mientras se intentaba hacer el corte, por lo cual los datos no ajustaron a ningún modelo. Se hace la aclaración que esta metodología no es aplicable a suelos con contenido de gravilla con un diámetro mayor a 1 cm.

3.2.5. Parámetros de transporte

Para dar solución al tercer objetivo específico de la presente investigación, se hace necesario describir el transporte de solutos (en este caso NaCl) en el suelo en condiciones de no saturación obteniendo los parámetros del modelo con un problema inverso mediante la optimización no lineal donde se introduce la información obtenida de la prueba de la curva del efluente o BTC por sus siglas en ingles, realizada para cada horizonte de suelo natural, el horizonte con el biocarbonizado seleccionado, la columna de suelo testigo, y la columna de suelo con la adición de BCRet en los primeros 10 cm simulando la incorporación con una mecanización no intensiva para disminuir la compactación y pérdida de estructura.

Para lo cual se separó el contenido de suelo de los 10 cm superficiales de uno de los monolitos o columnas de suelo inalteradas extraídas en campo, y se incorporó en una mezcladora por 15 min a 150 rpm como se observa en la figura **3-9**, para luego ser acomodado en la superficie de la misma columna, para esto se sigue con la metodología de la curva del efluente expuesto en (LIMA, 2003)



Figura 3-9: Mezcladora de suelo con biocarbonizado

Para el ensayo del PULSO, el cual se llevó a cabo en las columnas completas de suelo, se realizó una aplicación de 1000 ppm de NaCl, en un volumen definido como el volumen real de poros, con lo cual se asegura que todo el espacio poroso va a estar en contacto con el trazador, definida como el volumen de la columna por la porosidad, o como la diferencia de peso entre la columna seca y la columna saturada, que para estos ensayos por tiempos de la prueba se realizó la aplicación del 70 % del volumen real de poros. Al tenerse el volumen y la velocidad de aplicación, se calcula el tiempo para el cual se ha consumido el volumen del trazador el cual será el tiempo en el cual se cambia la alimentación de la columna del tanque del trazador por el tanque de agua como se observa en la figura **3-10** para realizar el lavado y observar el comportamiento de la concentración en el tiempo, hasta que se encuentren los valores iniciales o se alcance una concentración constante; estos valores fueron medidos con conductivímetro para conocer cuando se alcanzaba el pico, sin embargo todas las muestras fueron llevadas a medición por cromatografía iónica, ya que la conductividad mide cualquier ión y el interés de la investigación era el cloruro .

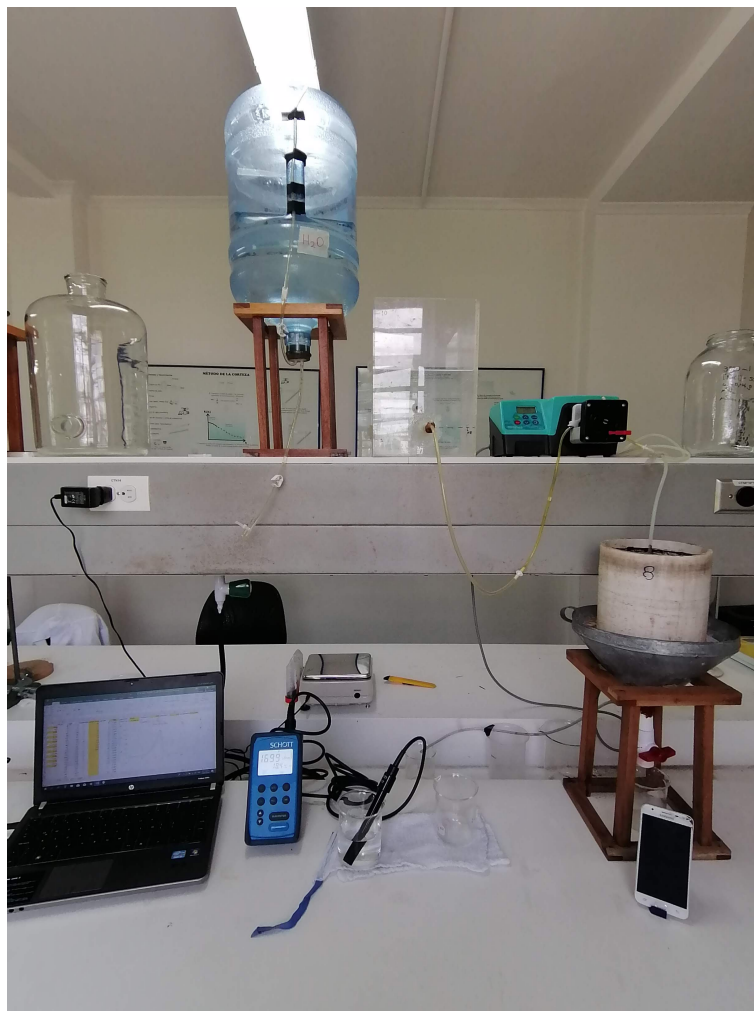


Figura 3-10: Montaje de curvas del efluente, donde se observa el tanque del trazador y el tanque de agua, la bomba peristáltica y el conductivímetro

El ensayo del STEP se realiza para la obtención de los parámetros de transporte para cada uno de los horizontes por separado, donde la aplicación del volumen de trazador es mayor al anterior, ya que no se relaciona con el volumen de poros, sino con el tiempo en el que tarda en llegar a una concentración de 90 a casi 100 % de la concentración aplicada, en este caso, con fines de comparación se realizó con los mismos 1000 ppm de NaCl, y al igual que en la anterior prueba, se toman los datos y muestras en tubos falcon de 15 mL cada 15 o 30 minutos dependiendo de la velocidad de reacción del suelo o tiempo de llegada de la primera traza de NaCl, como se observa en la figura **3-11**

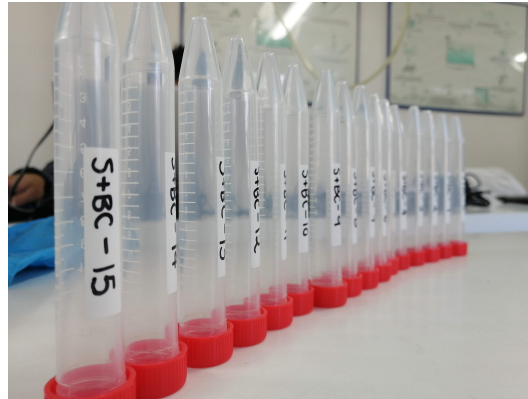


Figura 3-11: Muestras de agua del effluente de la columna a determinados tiempos para cuantificación de cloruros en cromatógrafo iónico

Una vez obtenidos los resultados con la metodología anteriormente mencionada, se prosigue con la aplicación de los diferentes software para la simulación de flujo y transporte que sera descrito a continuación.

3.3. Modelación numérica de flujo y transporte

En esta sección se explica como se implementaron los software utilizados para la obtención de los datos de la modelación numerica y como se llevó a cabo la validación de los mismos con las columnas de suelos.

3.3.1. RETC

Al tener la información de los puntos de retención de humedad, la conductividad hidráulica medida en el laboratorio, se hace uso de la herramienta RETC, donde se hizo uso de las funciones de pedotransferencia de Rosetta Lite con la información de textura, densidad y tensiones del horizonte que estaba corriendo, para predecir los mejores parámetros de flujo iniciales, luego se probó con los 8 modelos paramétricos de Brooks-Corey, Van Genuchten, lognormal de Kosugi y de doble permeabilidad de Durner, que se encuentran detallados en el manual técnico de RECT (van Genuchten et al., 1991b) con los cuales se evaluó el mejor comportamiento, mejor R^2 y menor error para los datos observados; con el fin de cuantificar los parámetros de flujo de cada uno de los horizontes, que luego fueron usados como parámetros de entrada de HYDRUS para simular flujo.

3.3.2. STANMOD

Una vez obtenidas las curvas del effluente o BTC, se hace uso del modelo CXTFIT (Simunek et al., 1999) para realizar un problema inverso (optimización no lineal) con el fin de los

parámetros de transporte, e iniciar por el modelo de equilibrio basado en la ecuación CDE como se explica en la ecuación 2-32, se definen las unidades de trabajo, condiciones de contorno, y se introducen los valores de velocidad de poro que fue cuantificado mientras se realizaban las BTC anteriormente mencionadas. El coeficiente de retardo no se pudo comparar con el 1 del trazador ya que la sal que se quiere modelar es normalmente utilizada como trazador para otras sustancias, se intentó con el bromuro, pero su comportamiento era tan parecido al NaCl que no ofrecía información relevante, sin embargo el único parámetro a ajustar en el modelo de equilibrio fue el coeficiente de dispersión D . luego se definió el modelo de no equilibrio PNE basado en el modelo movil-inmovil donde aparecen los parámetros β el cual relaciona la región movil con la inmovil y ω la cual es la difusión entre la fase movil-inmovil.

Se introdujo la información obtenida de las BTC, las condiciones de contorno y la profundidad a la cual se obtiene la información, que en este caso, fue al final de la columna, justo donde se da la salida del efluente, lo cual es importante para contrastar con la información simulada en HYDRUS para realizar la validación del mismo.

3.3.3. HYDRUS 1D

Hydrus es el software donde se van a reunir todos los parámetros anteriormente obtenidos para simular las condiciones y validarlas con lo medido en las columnas. Para lo cual, se inició por seleccionar el modulo de flujo de agua y transporte de solutos, se introdujo la geometría del modelo que, para esta investigación son dos escenarios, el primero del suelo testigo, donde se tienen dos horizontes cada una de 15 cm, y el otro escenario donde se tienen tres horizontes, ya que los 10 primeros centímetros hacen parte del horizonte modificado con la adición del biocarbonizado en una relación 1:10 en peso, como se observa en la figura **3-12**

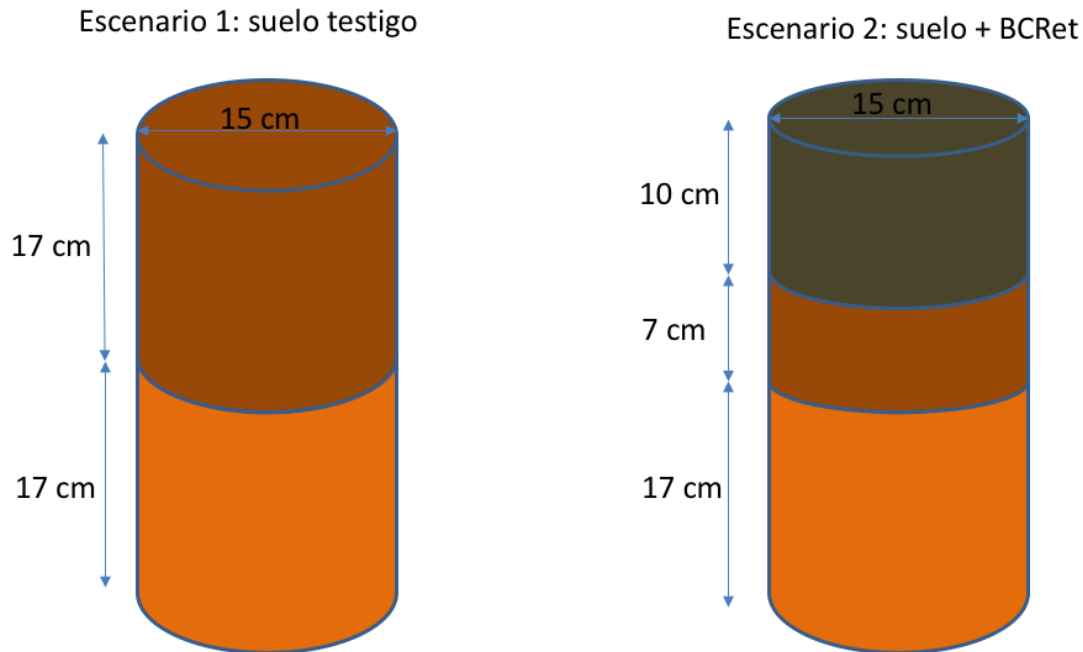


Figura 3-12: Escenarios a modelar en hydrus, siendo (a) el suelo testigo y (b) el suelo con la adición del biocarbonizado a los 10 cm superiores. (Tomado de Hydrus 1D)

Luego se introdujo la discretización de tiempo en las unidades a horas, se escogió el modelo hidráulico de van Genuchten - Mualem sin histéresis, se introdujeron los parámetros obtenidos y ajustados por RETC, se colocaron las condiciones de contorno, superior de flujo constante e inferior de drenaje libre, se coloca el flujo de aplicación, el cual es el mismo que con el que se llevó a cabo los ensayos de BTC, y es el mismo para los dos escenarios para poder compararlos; en el modulo de transporte se inició con condiciones de equilibrio, donde se introdujo la densidad aparente del suelo y la dispersividad longitudinal que se despejó de los datos obtenidos del STANMOD haciendo uso de la ecuación 2-26, el tiempo y la concentración en el cual se llevó a cabo la prueba del trazador, en el editor de gráfico se colocó un nodo a la salida de cada columna, ya que esa es la información que se tiene de las BTC, es decir que ese es el punto donde se pueden comparar los resultados para validar el modelo. Una vez terminado este capítulo donde se mostró la metodología con la cual se llevó a cabo la experimentación, se introduce el siguiente capítulo donde se encuentran los resultados y discusión de las pruebas mencionadas.

4 Resultados y discusión

En este capítulo se mostrarán los resultados de los análisis de laboratorio realizados para el suelo testigo y el biocarbonizado seleccionado, para su análisis y comparación en cuanto a propiedades físico-químicas generales y de adsorción de cloruros seleccionando el biocarbonizado óptimo para suelo en cuestión.

4.1. Propiedades físico-químicas del suelo y los biocarbonizados

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos en cuanto a la descripción y caracterización del suelo testigo en campo, resultados de análisis de laboratorio de textura, densidades y porosidad, pH, elementos mayores, caracterización de los biocarbonizados y sus isotermas de adsorción, para finalmente mostrar la comparación del suelo testigo en condiciones naturales contra el suelo con la adición del biocarbonizado escogido.

4.1.1. Caracterización suelo testigo

A continuación se presentará la información edafológica descrita en campo para la caracterización y clasificación taxonómica del suelo testigo.

Localización geográfica, departamento de Meta en el municipio de Puerto Gaitán, vereda Rubiales, finca la Rusia. Coordenadas geográficas: N 3 47 43,24 - W 71 21 39,27, altitud de 199 msnm; se encuentra en un paisaje de lomerío, tipo de relieve, lomas y forma del terreno, ladera; el material parental son alteritas de rocas sedimentarias tipo arcillolitas y conglomerados; su pendiente es ligeramente inclinada (3 - 12 %); su clima ambiental es cálido, seco, con precipitación anual entre 1000-2000 mm/año, temperatura anual promedio de 24°C; el régimen de temperatura es isohipertérmico y el régimen de humedad es ústico; presenta evidencias de erosión hídrica, laminar en un grado ligero; No se evidencian inundaciones; Se evidencian encharcamientos de frecuencia ocasional y duración larga; para el momento de la visita, no se evidencia nivel freático aparente; su drenaje natural es imperfectamente drenado; su vegetación natural ha sido sustituida en su totalidad y su uso actual es ganadería extensiva.

Una vez realizada y descrita la calicata, se resume la información como se observa en el tabla 4-1 donde se describe lo encontrado en cada uno de los horizontes que hacen parte del perfil CA-01

Tabla 4-1: Descripción perfil de CA-01.

Ap 0 – 10 cm	Color en húmedo pardo amarillento (10YR5/8); textura franca con pocos fragmentos de roca tipo grava fina (5 %); estructura en bloques subangulares, finos y medios, moderados; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; muchos poros medianos; muchas raíces, finas, vivas, de distribución normal; frecuente actividad de macroorganismos; límite claro y plano; pH 4.0, reacción extremadamente ácida y reacción a H ₂ O ₂ ligera.
Ac 10 – 17 cm	Color en húmedo pardo amarillo pardusco (10YR6/6); sin textura identificable con abundantes fragmentos de roca tipo grava fina (petroférica) (70 %); muchos poros grandes; frecuentes raíces, finas, vivas, de distribución normal; frecuente actividad de macroorganismos; límite abrupto; pH 4.5, reacción muy fuertemente ácida. Se aclara que esta es una capa y no un horizonte por su espesor.
Bo 17 – 41 cm	Color en húmedo amarillo rojizo (7.5YR6/8); textura franco arcillo limosa sin presencia de fragmentos de roca; estructura en bloques subangulares, finos y medios, moderados; consistencia en húmedo friable, en mojado ligeramente pegajosa y ligeramente plástica; pocos poros finos; pocas raíces, finas, vivas y muertas, de distribución normal; poca actividad de macroorganismos; límite difuso; pH 4.5, reacción muy fuertemente ácida.
Cv 41 – 82 cm	Color en húmedo gris claro (5Y7/2) y rojo (2.5YR4/8) en un 40 %; textura arcillo limosa, sin estructura (masiva); presencia de plintita en un 40 % consistencia en mojado pegajosa y plástica; pocos poros muy finos; muchas raíces, muy finas, vivas y muertas; muy poca actividad de macroorganismos; pH 4.5, reacción muy fuertemente ácida.
Cg2 82 - 120 cm	Color en húmedo rojo (2.5YR4/8) y gris verdoso (5GY6/1) en un 40 %; textura franco arcillosa, sin estructura (masiva); consistencia en mojado muy pegajosa y plástica; pocos poros muy finos; no hay raíces; no hay actividad de macroorganismos; pH 5.0, reacción fuertemente ácida.

De acuerdo con la información anteriormente presentada, se evidencia un epipedón ócrico y un endopedón óxico como horizontes diagnóstico, los cuales dan lugar a la clasificación taxonómica **Aquic Petroferric Haplustox, franca fina, isohipertérmica**, que evidencia un orden de suelos **oxisol**, un régimen de humedad **ústico**, un contacto **petroférico** debido a la gravilla a los 10 cm, un intergrado **ácuico** debido a las condiciones de oxido-reducción de los dos últimos horizontes, familia por tamaño de partícula **franca fina** y un régimen por temperatura **isohipertérmico**.

Análisis físico-químicos

Para obtener parámetros que son usados en los modelos de flujo y transporte y corroborar la clasificación taxonómica realizada en campo, se obtienen los siguientes resultados físico-químicos, los cuales se realizaron para los tres primeros horizontes delimitado por las condiciones de oxido-reducción de los últimos que se convierten en una limitante para el flujo de un vertimiento, y a su vez en una condición de contorno del suelo; adicionalmente, se aclara que la capa de gravilla se asume en el primer horizonte, ya que la metodología de análisis de laboratorio excluye los fragmentos de roca. Por otro lado, para disminuir el error, se realizó por triplicado cada uno de los análisis de cada muestra para luego ser promediados, si no diferían considerablemente entre sí.

- Textura: el tamaño de partícula del suelo testigo encontrado para el suelo testigo y cada uno de sus horizontes son; Franco para el primer horizonte y Franco Arcilloso para los dos siguientes, como se observa en la tabla 4-2

Tabla 4-2: Granulometría por el método de pipeta

Horizonte	Arena (%)	Limo(%)	Arcilla(%)
Ap: 0-17 cm	42,317	29,960	27,723
Bo: 17-41 cm	28,420	34,093	37,487
Cv: 41-82 cm	25,393	36,417	38,190

- Porosidad: la cual relaciona el volumen de espacios vacíos sobre el volumen de la muestra de suelo, y a su vez, relacionados directamente con las medidas de densidad aparente y real como se observa en la tabla 4-3, donde se evidencia una porosidad de suelo medio en el primer horizonte y suelos ligeros en los dos siguientes.

Tabla 4-3: Densidades y porosidad del suelo testigo

Horizonte	Densidad real (g/cm ³)	Densidad aparente (g/cm ³)	Porosidad (%)
Ap: 0-17 cm	2,52	1,18	53,2
Bo: 17-41 cm	2,20	1,36	38,0
Cv: 41-82 cm	2,05	1,4	31,7

- Características químicas: con el fin de medir y comparar el efecto del biocarbonizado con fines agrológicos, se realiza la línea base de las propiedades químicas del suelo en condiciones naturales, como se observa en las tablas 4-4 y 4-5, donde se evidencia que el pH es extremadamente ácido en todo el perfil, el contenido de carbono orgánico en condiciones de clima cálido, es medio para el primer horizonte y bajo para los otros dos y el fósforo se encuentra en niveles muy bajos, lo anterior según la tabla de interpretación de análisis de suelos de 22749.

Tabla 4-4: pH y fósforo del suelo testigo

Horizonte	pH	Carbono orgánico (%)	P (mg/kg)
Ap: 0-17 cm	4,96	2,3	7,73
Bo: 17-41 cm	4,63	0,9	4,28
Cv: 41-82 cm	4,66	0,3	4,66

Adicional a lo anterior, se encuentra también que los valores de Ca, K, Mg y Na son muy bajos, al igual que la capacidad de intercambio catiónica (CIC) como se observa en la tabla 4-5, lo cual es representativo de suelos tan lavados, evolucionados y pobres en fertilidad como lo son los oxisoles; Por otra parte el aluminio presente en el suelo es convierte en una limitante por presentar niveles tóxicos para la mayoría de cultivos (Castro Franco, 1998).

Tabla 4-5: Elementos mayores y CIC del suelo testigo

Horizonte	Ca	K	Mg	Na	Al	CICE
	meq/100g					
Ap: 0-17 cm	0,46	0,10	0,123	0,047	1,92	2,64
Bo: 17-41 cm	0,19	0,03	0,037	0,023	2,57	2,86
Cv: 41-82 cm	0,19	0,04	0,033	0,030	3,50	3,79

4.1.2. Caracterización de biocarbonizados

En esta sección se muestra la información de los carbones con los que se contó para llevar a cabo la experimentación, a los cuales se realizó la caracterización por análisis elemental de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O) y nitrógeno (N); y el análisis próximo de cenizas, carbono fijo (CF), y materia volátil (M.V.) como se observa en la tabla 4-1

Muestra	Análisis Elemental (% peso, base seca)					Análisis próximo (% peso, base seca)		
	C	H	O	N	S	Cenizas	CF	M.V.
BCRet	80,4	3,5	12,9	0,9	0,0	2,4	66,4	26,1
CARet	82,8	3,0	13,1	0,8	0,0	0,3	66,5	28,0
CAC	58,3	0,3	8,78	0,7	0,0	31,5	53,3	15,2

Figura 4-1: Análisis elemental y próximo de los biocarbonizados

donde se pone en evidencia el alto contenido de carbono de las muestras basadas en la madera de Retamo espinoso que permite proveer un aporte en carbono a la composición del suelo al cual se acondicionará. De otro lado, el biochar de residuos de palmicultura con un porcentaje menor de carbono y de materia volátil presenta un contenido muy alto de cenizas reflejando la contaminación de otros componentes de tipo inorgánico distintos a los materiales propios de cuesco de la palma.

Al comparar los biochar provenientes de Retamo Espinoso, puede apreciarse que la activación del produce un material CARet más limpio en cuanto a constituyentes inorgánicos siendo su principal diferencia el contenido de cenizas, el cual disminuye drásticamente, poniendo en evidencia la naturaleza de la materia mineral característica de la biomasa de partida.

Es importante resaltar que el CAC no solo contiene menos carbono fijo sino que también es el que menos materia volátil presenta lo cual podría ser una desventaja si se analiza desde el punto de vista del tipo de carbono más estable que se formó durante su preparación. En

general, el contenido de oxígeno de todos los biochar exhiben la presencia de grupos funcionales que le imprimen propiedades ácidas o básicas y que sirven como puntos de anclaje para modificar la capacidad de retención y almacenamiento de agua.

Adicionalmente se realizó un análisis por espectroscopía RAMAN para los biocarbonizados, los cuales contienen las bandas típicas de materiales carbonosos en el intervalo entre 1000 y 3100 cm^{-1} . La presencia de la banda en torno a 1601 y 1583 cm^{-1} del CAC y del BCRet respectivamente está asociada con capas aromáticas muy organizadas lo cual da cuenta de que el material contiene sitios con estructura similar a la del grafito; esta banda se denomina como “banda G”. Las bandas centradas en 1341 y 1367 cm^{-1} , denominadas “bandas D”, presentes en CAC y BCRet respectivamente se asocian a imperfecciones o defectos en la estructura del material las cuales pueden reflejarse como un desorden en las lamelas que se forman durante la carbonización de la biomasa. Puede apreciarse en el espectro RAMAN del CA que las bandas D y G son menos intensas que las del BCRet y están más separadas; la banda G con un ligero corrimiento hacia mayores frecuencias y la banda D es más ancha y con un hombro alrededor de 1170 cm^{-1} típico de carbonizados muy desordenados poniendo en evidencia el grado de desorden en las secciones orgánicas donde podrían alojarse grupos funcionales oxigenados. Estos resultados están de acuerdo con lo encontrado en el análisis elemental y próximo donde la muestra CA es la que contiene más cenizas y menos carbono. Las bandas entre 2200 y 3500 cm^{-1} obedecen a sobretonos de las bandas D y confirman un material con sitios defectuosos o con grupos funcionales que pueden actuar de manera positiva en la capacidad de retención y almacenamiento de agua (Ferrari and Robertson, 2000) (J.J Song et al., 1976) (Wang et al., 1990).

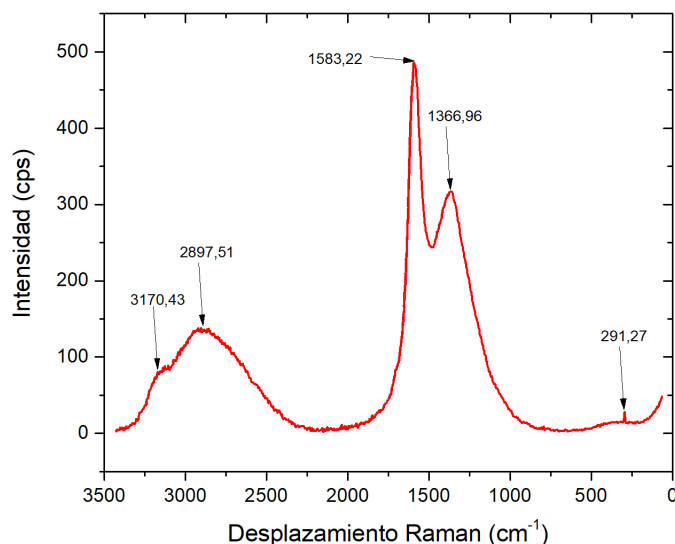


Figura 4-2: RAMAN biochar retamo espinoso

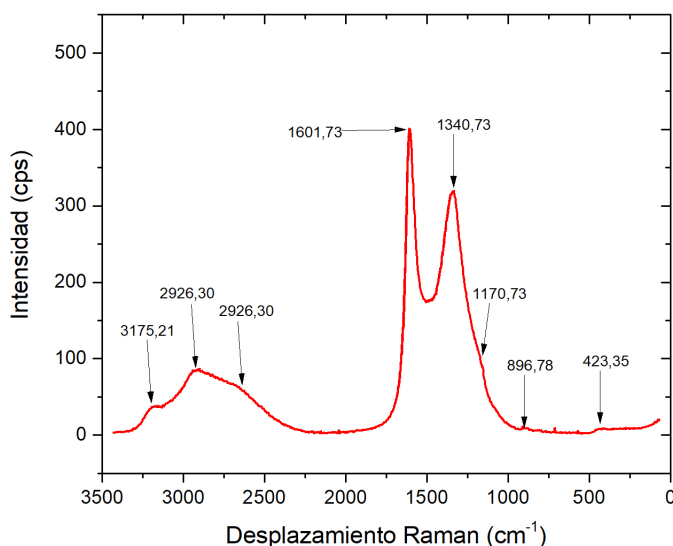


Figura 4-3: RAMAN carbón activado de cuesco de palma

Adicionalmente, se puso a agitar cada biocarbonizado con agua des-ionizada para cuantificar los iones que podían estar presentes e interferir en las mediciones de la titulación, para lo cual se obtuvo la siguiente tabla 4-6

Tabla 4-6: Cromatografía iónica y pH de cada biocarbonizado

Biocarbonizado	Cloruros (mg/g)	Sulfatos (mg/g)	Fosfatos (mg/g)	Fluoruros (mg/g)	pH
BCRet	0,069	0,036	0,168	0,001	7,76
CARet	0,014	0,122	0,006	ND	3,66
CAcp	ND	0,065	0,435	ND	9,33

Donde se puede observar que el carbón activado de cuesco de palma, muestra valores considerablemente altos de fosfatos que confirma la contaminación de especies inorgánicas halladas en el contenido de cenizas, pudiendo ocupar el espacio de iones cloruro que hubiesen podido ser retenidos. Por otro lado, se observa que el carbón activado químicamente de retamo espinoso, a pesar de los múltiples lavados, no se logró llevar a condiciones neutras contrario a lo que reporto (Mr.M.Shanmugasundaram, Dr.K.Sudalaimani, 2012). De esta forma se considera que, como el pH del suelo testigo también es extremadamente ácido, no es conveniente su selección porque podría alterar negativamente la microbiología, disponibilidad de nutrientes, fertilidad y salud del suelo.

4.1.3. Isotermas de adsorción

En esta sección se muestran los resultados de las isotermas de adsorción de cada uno de los horizontes del suelo de los cuales se obtuvieron las columnas hasta los 40 cm por lo cual, se muestra el tiempo de equilibrio y las isotermas de los dos primeros horizontes, H1 (0-17 cm) y H2 (17-40 cm); por otro lado se obtienen las isotermas para cada uno de los carbonizados con los que se contó para realizar la experimentación, que se inició con la obtención de la constante de adsorción durante 1 hr para todos los biocarbonizados, como se explicó en la metodología, haciendo uso de la ecuación 3-1, donde se obtuvo la siguiente tabla 4-7 evidenciando que el carbón activado de cuesco de palma presenta procesos de desorción de iones, mientras que el biochar de retamo espinoso activado alcanzó a retener casi un 20 % de la concentración inicial, mientras que el biochar de retamo espinoso retuvo el 2 %.

Tabla 4-7: Constante de adsorción de los biocarbonizados

BC	Co (mg/L)	Ce (mg/L)	q_e (mg/g)	K_d (L/Kg)
BCRet	1016,65	995,19	0,21	0,22
CARet	1016,65	784,32	2,32	2,96
CACP	1011,76	1359,59	-3,47	-2,55

Por otra parte, realizando las isotermas de adsorción multiconcentración, se encontró que el carbón activado térmicamente de cuesco de palma y el biochar de retamo espinoso mostraron procesos de desorción de NaCl a cualquier concentración, por lo cual no se obtienen las isotermas de adsorción, ya que los modelos se aplican a la función con valores positivos; sin embargo, el biocarbonizado de retamo espinoso activado químicamente, si mostró valores de retención como se observa en la isoterma 4-4

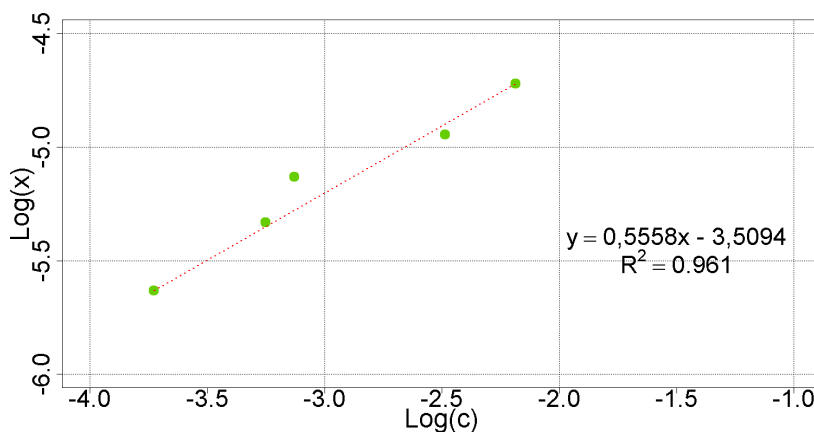


Figura 4-4: Isoterma de carbón activado de retamo espinoso

Donde es evidente la no linealidad la isoterma, ni tiende a volverse asintótica a mayor concentración, por lo cual el modelo que mejor la explica es el de Freundlich, ajustandose a una función potencial, como fue explicado en la metodología con la ecuación 3-3, donde se evidencia que el valor de K_f es muy bajo indicando una muy baja capacidad de adsorción por parte del biocarbonizado, al igual que el valor de n que indica la intensidad de dicha adsorción.

Por otra parte, se realizó la obtención de las isotermas de adsorción para cada uno de los horizontes del suelo 4-5

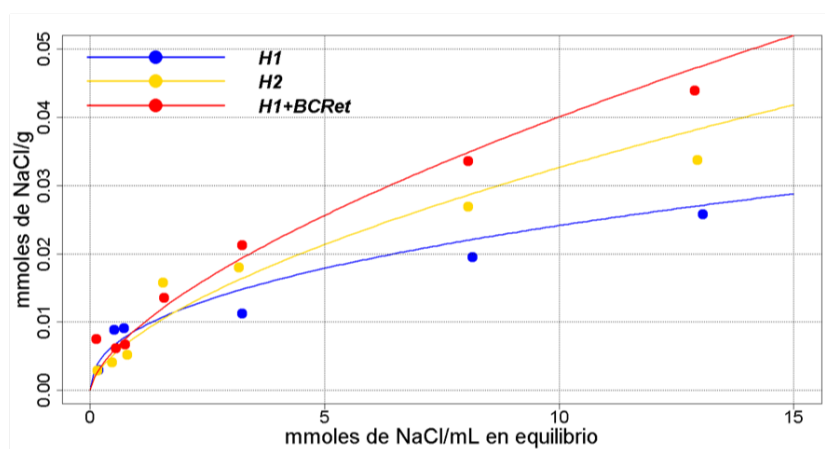


Figura 4-5: Isotermas de los horizontes del suelo

Tabla 4-8: Parámetros de Freundlich para la adsorción de NaCl

Adsorbente	K_f	n	R^2
H1	2,86	0,43	0,932
H2	3,26	0,61	0,929
H1+BCret	3,30	0,64	0,907

Teniendo en cuenta que a indica la capacidad de adsorber, se observa que el carbón activado de retamo espinoso presenta mejores valores, sin embargo no son considerablemente altos. Teniendo en cuenta que en todos los casos n tiene valores menores que 2, intensidad de adsorción es baja indicando que la interacción que se presenta entre el suelo o biocarbonizados con la solución de NaCl puede ser debida a una adsorción física.

Una vez obtenidos los resultados de las caracterizaciones físico-químicas, de adsorción de cloruros, viabilidad edáfica, económica y ambiental se identifica que el carbón activado térmicamente de cuesco de palma presenta condiciones de desorción de cloruros, lo cual presenta

condiciones contrarias a lo buscado en la investigación, por tanto se descartó su uso en los procedimientos siguientes; a si mismo, se considera que, el biocarbonizado activado CARet, con mejores características de retención de cloruros, es muy ácido para ser utilizado en oxisoles como el suelo testigo; adicional a lo anterior, se evidencia un costo muy alto en la activación química, ya que al escalar las cantidades para una aplicación en campo, sería totalmente inviable.

En este sentido se selecciona el biocarbonizado BCRet, dado que es económico, presenta óptimas condiciones de pH como enmienda para el suelo, un área BET que da cuenta de una porosidad adecuada en este tipo de aplicaciones y se pone en evidencia el alto contenido de carbono fijo y oxígeno que sirven como anclaje para modificar la capacidad de retención de agua y modificar los parámetros de transporte de solutos, como se evidencia mas adelante.

4.1.4. Caracterización suelo + biocarbonizado

Una vez seleccionado el Biocarbonizado de retamo espinoso (BCRet) como el mas viable en la aplicación a suelos, se realizaron las mismas pruebas físico-químicas que se llevaron a cabo al suelo testigo con el fin de comparar las condiciones con la aplicación del BCRet en la relación en peso 1:10 sobre el primer horizonte a una profundidad de 10 cm con el fin de minimizar los impactos producidos por el exceso de mecanización.

- **Tamaño de partícula:** se evidencia los cambios en las propiedades físicas como el cambio en la distribución del tamaño de partículas, para lo cual se sigue con la metodología de Bouyoucos para suelos, en donde se encuentra que el biocarbonizado al no ser un minera del suelo, sino un agente externo, puede no dispersar apropiadamente con el hexametáfosfato de sodio, por lo cual aumentó el porcentaje del tamaño que corresponde a las arenas como se observa en la tabla 4-9, cambiando las propiedades de porosidad y velocidad del flujo que se explicará mas adelante.

Tabla 4-9: Granulometría del H1 y el H1+BCRet

Horizonte	> 0,05	0,002-0,05	<0,002
	mm		
H1	42	30	28
H1+BCRet	62	23	15

- **Porosidad:** se observa también cambios notables en la porosidad del suelo con la adición del BCRet, debido principalmente al cambio de la densidad aparente, la cual fue alterada en los 10 primeros cm para incorporar el BCRet, lo cual además de afectar la

textura, modifíco la estructura del suelo testigo, factores que inciden directamente en la porosidad del suelo como se observa en la tabla **4-10**

Tabla 4-10: Densidades y porosidad del H1 y el H1+BCRet

Horizonte	Densidad real	Densidad aparente	Porosidad
	g/cm ³		%
H1	2,52	1,18	53,20
H1+BCRet	2,61	1,01	61,30

- Características químicas: con la información anteriormente mencionada de la línea base del suelo en condiciones naturales, se realizó la comparación del primer horizonte, con la adición del BCRet al mismo, como se observa en la tabla **4-11**, para lo cual se encuentra que se puede utilizar como enmienda para oxisoles, ya que modifica el pH de extremadamente a medianamente ácido y el contenido de carbono orgánico cambio de niveles muy bajos a muy altos, el cual es uno de los principales indicadores de la buena salud del suelo, ayudando a la oferta de nutrientes para las plantas y mejorando la disponibilidad de agua, lo cual modifica también los parámetros de flujo que se describirán en la siguiente sección.

Tabla 4-11: pH y fósforo del H1 y H1+BCRet

Horizonte	pH	Carbono orgánico	P
		(%)	mg/kg
H1	4,96	2,30	7,73
H1+BCRet	5,59	25,47	11,11

Adicionalmente, en cuanto a los elementos mayores se encontró que con la adición del BCRet se duplica el contenido de Ca, el K pasa de valores bajo a uno muy alto, el Mg, el Na y la CICE se mantienen en valores bajos, el contenido de Aluminio visto como porcentaje de saturación de aluminio, pasa de 73 a 19 % lo cual cambia radicalmente la limitante de profundidad efectiva del suelo testigo dada por la toxicidad mineral, dejándolo apto para cualquier cultivo, lo cual abre una puerta a más investigaciones en biocarbonizados como enmienda de oxisoles en la altillanura colombiana.

Tabla 4-12: Elementos mayores y CIC para el H1 y el H1+BCRet

Horizonte	Ca	K	Mg	Na	Al	CICE
	meq/100g					
H1	0,46	0,10	0,12	0,05	1,92	2,65
H1+BCRet	1,20	0,93	0,24	0,17	0,61	3,15

4.2. Variables hidrodinámicas

4.2.1. Pruebas en campo

Infiltración

En esta sección se contó con información obtenida de la prueba de anillos concéntricos como se explicó previamente en la metodología, y aplicando el modelo de infiltración de Kostiakov, se obtuvieron los parámetros como se observa en la tabla **4-13**, donde se muestra la heterogeneidad del medio a escasos 2,5 m de distancia entre sí de cada ensayo, evidenciado en el comportamiento de la lámina de agua infiltrada, como se observa en la figura **4-6**, variando la interpretación de la infiltración de moderadamente lenta a moderadamente rápida, sin embargo ofrece un valor promedio el cual se toma como punto de partida para las modelaciones de las cuales se tratará posteriormente.

Tabla 4-13: Infiltración básica del suelo testigo en campo

Ensayo	Parámetros de Kostiakov		Tiempo básico	Infiltración básica	Interpretación
	a	b	min	cm/hr	
I1	0,666	0,633	220,1	3,49	Moderada
I2	0,500	0,586	248,2	1,79	Moderadamente lenta
I3	0,350	0,778	133,0	5,52	Moderada
I4	0,294	0,887	68,1	9,69	Moderadamente rápida

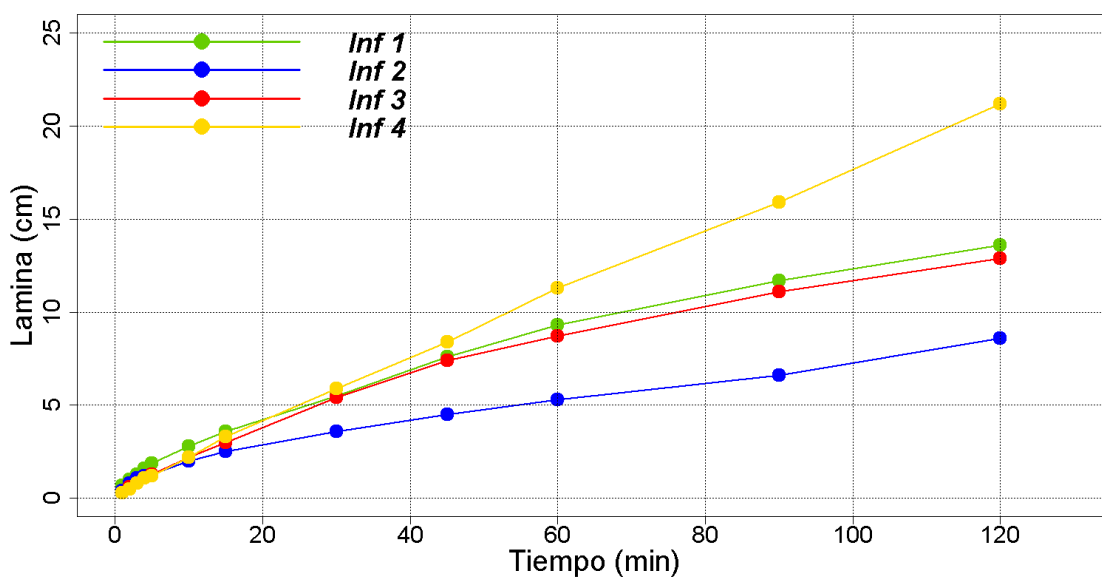


Figura 4-6: Lámina de agua acumulada

Conductividad Hidráulica saturada

Siguiendo con la metodología descrita de Porchet, se obtiene la conductividad saturada de los 80 primeros cm del suelo, en 4 orificios realizados con el mismo barreno de radio 4,75 cm, todas en un tiempo de 20 minutos y un distanciamiento entre puntos de 2,5 m para evaluar la heterogeneidad del suelo donde se obtuvieron las columnas inalteradas, obteniendo la información de la tabla

Tabla 4-14: Conductividad hidráulica saturada, método Porchet

Prueba	H inicial (cm)	H final (cm)	Ks (m/día)	Interpretación
Ks1	3,9	6,8	0,65	Moderada
Ks2	4	9,9	1,12	Moderada
Ks3	3,1	9,1	1,26	Moderadamente rápida
Ks4	1	6,9	1,72	Moderadamente rápida

Donde al igual que con la infiltración se encuentran valores en diferentes rangos de interpretación, debido a los cambios en la textura y la capa de gravilla que puede afectar directamente el comportamiento del movimiento del agua a pocos metros de distancia entre sí, como se

observa en la figura 4-7

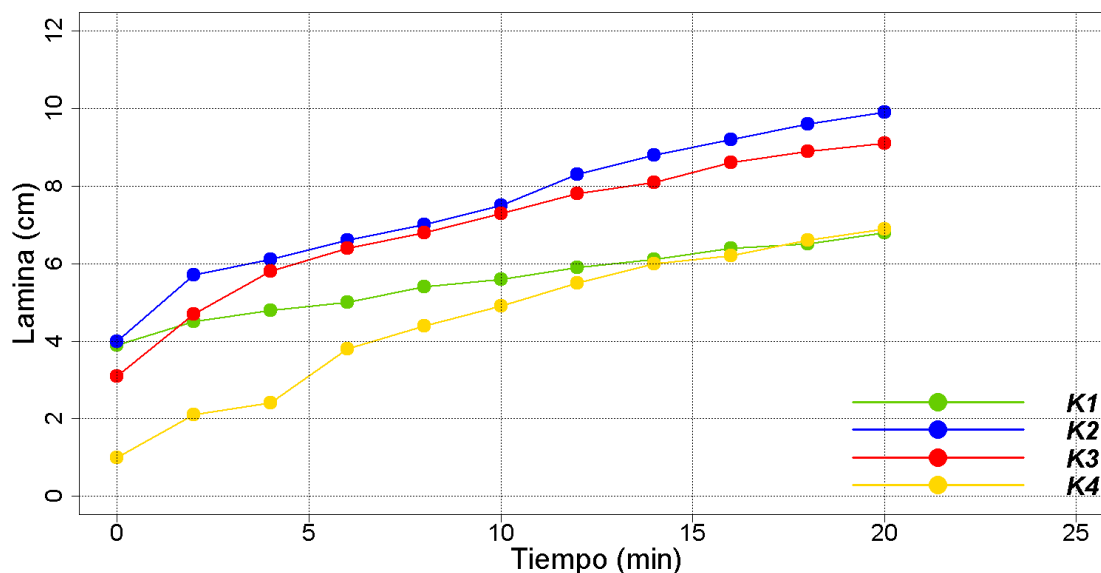


Figura 4-7: Lámina de agua acumulada

4.2.2. Pruebas de laboratorio

Con el fin de comparar la información de campo, y obtener mayor cantidad de parámetros para el modelo de flujo y transporte, se realizan las curvas de retención de humedad para cada uno de los horizontes a modelar, así como el H1+BCRet para la comparación de las propiedades hidrodinámicas y como insumo del software RETC, adicionalmente, se realizan las pruebas en estado estable de conductividad saturada y no saturada como insumo al software STANMOD para la obtención de los parámetros de transporte de solutos.

Conductividad saturada de carga constante

Con el fin de utilizar esta información en los modelos de transporte de STANMOD, adicionalmente a encontrar el estado estable de la conductividad saturada, se busca encontrar el tiempo para el cual el suelo se estabiliza en condiciones de saturación y NO saturación para obtener la conductividad no saturada en estado estacionario y con ella relacionar la velocidad de poros con la cual se realizó las curvas del effluente.

Para ello se obtuvo inicialmente la K_s para cada uno de los horizontes; H1, H1+BCRet y H2, por separado como se observa en la figura 4-8, donde se puede evidenciar que el que el horizonte H1+BCRet presenta condiciones mas rápidas, debido a que la estructura y acomodación de los agregados del suelo fueron alterados, cambiando la porosidad; por otro

lado se observa que el H2 al tener mayor contenido de arcilla, presenta un movimiento más lento y estable que los anteriores.

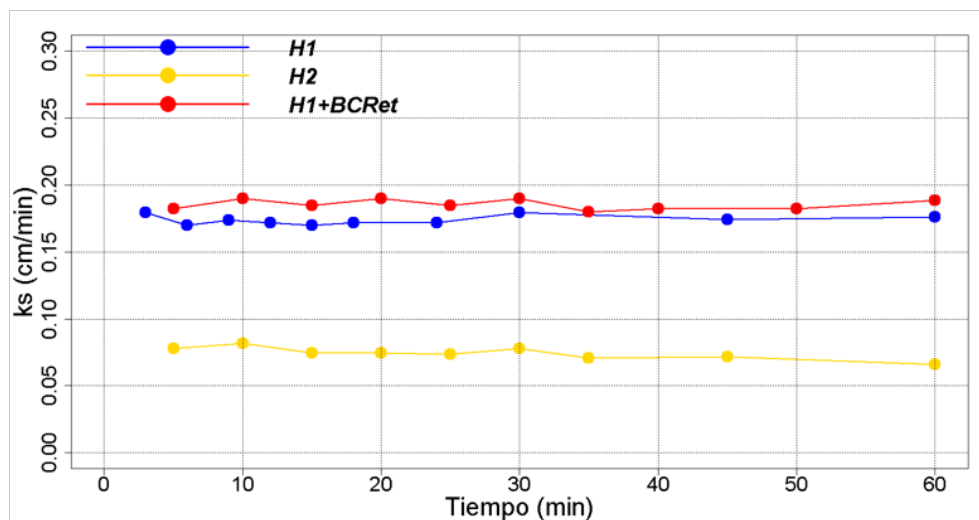


Figura 4-8: Conductividad saturada de cada horizonte

De igual manera se realizó la conductividad saturada equivalente para las columnas de suelo y suelo+BCRet, como se observa en la figura 4-9, donde se evidencia que el flujo de agua en el suelo que tiene el biocarbonizado incorporado disminuye a la tercera parte del suelo testigo y muestra un comportamiento mas estable, alcanzando el equilibrio en menos tiempo; el resultado de cada horizonte se observa en la tabla 4-16.

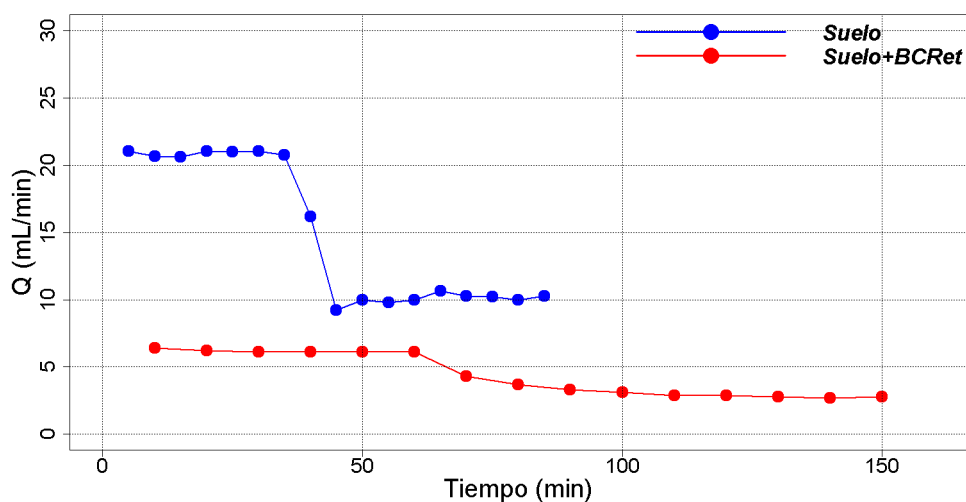


Figura 4-9: Conductividad saturada equivalente de las columnas con suelo y suelo +BCRet

La idea de obtener la conductividad hidráulica en estado estacionario a la mitad de la K_s , era obtener el valor mínimo al cual se podía relacionar la velocidad de aplicación para la

prueba con las columnas para dejar este valor igual a las dos y con ello, comparar los demás parámetros, obteniendo un caudal de $3,3 \text{ cm}^3/\text{min}$, que dividido en el área transversal de la columna se tuvo una velocidad de aplicación de $0,018 \text{ cm}/\text{min}$ controlada por la bomba peristáltica.

Curvas de retención de humedad

Se llevó a cabo la obtención de puntos a las tensiones de 0.3, 1, 5, 10 y 15 bares cada uno por triplicado para cada muestra de los horizontes H1, H1+BCRet y H2, como se observa en la tabla 4-15, donde el agua que se encuentra disponible con cierta facilidad para las raíces de las plantas tiene valores muy bajos en el suelo testigo y cambia a un valor medio el horizonte que se combina con el BCRet debido a la capacidad de retención del biocarbonizado y a la hidrofobia y el área de superficial del mismo.

Tabla 4-15: Puntos de retención de humedad

Horizonte	0,3	1	5	10	15	Humedad aprovechable
	bar					(%)
H1	17,57	17,03	15,00	13,23	13,53	4,64
H1+BCret	24,87	21,33	17,87	17,93	15,43	10,85
H2	20,77	20,67	18,43	17,33	16,36	4,44

Con la información anterior se alimentó el software RETC para obtener los parámetros de flujo que mejor se ajustaran a la información del laboratorio, encontrando que después de correr los 8 modelos ofrecidos por el software, el que mejor ajuste y mayor información dio era el modelo de van Genuchten para la CRH y Mualem para la CCH, como se explicó en la metodología, adicionalmente, se restringieron los modelos que se implementarían en Hydrus lo cual se muestra la siguiente tabla 4-16;

Tabla 4-16: Parámetros de flujo de RETC

Horizonte	θ_r	θ_s	α	n	Ks (cm/min)	R^2
H1	0,0221	0,2855	0,2091	1,0753	0,1725	0,9185
H1+BCret	0,0690	0,4066	0,1341	1,1669	0,1854	0,9659
H2	0,1839	0,2841	0,0002	1,6157	0,0666	0,9579

En la figura de comparación 4-10 se observa el aumento de la capacidad de retención de humedad del suelo testigo vs el suelo con el biocarbonizado, ya que los contenidos de humedad residual y de saturación se encuentran con una mayor amplitud en el suelo con el BC, mejorando las condiciones de retención y almacenamiento de agua, debido al área superficial de BCRet, ayudando al oxisol a poder tomar más agua en época de lluvia y mantenerla y no soltarla tan fácilmente en época de sequía, siendo un factor decisivo en los llanos orientales, debido al comportamiento monomodal de lluvias.

La curva de retención del segundo horizonte presenta valores típicos comparados con la bibliografía de curvas de retención de oxisoles, donde se observa la poca cantidad de agua que puede almacenar, debido a la mineralogía de la zona, donde se encuentra en su mayoría caolinitas de muy baja capacidad de intercambio catiónico y retención de humedad (Gómez et al., 2016), evidenciada en la estrecha curva de la figura 4-10

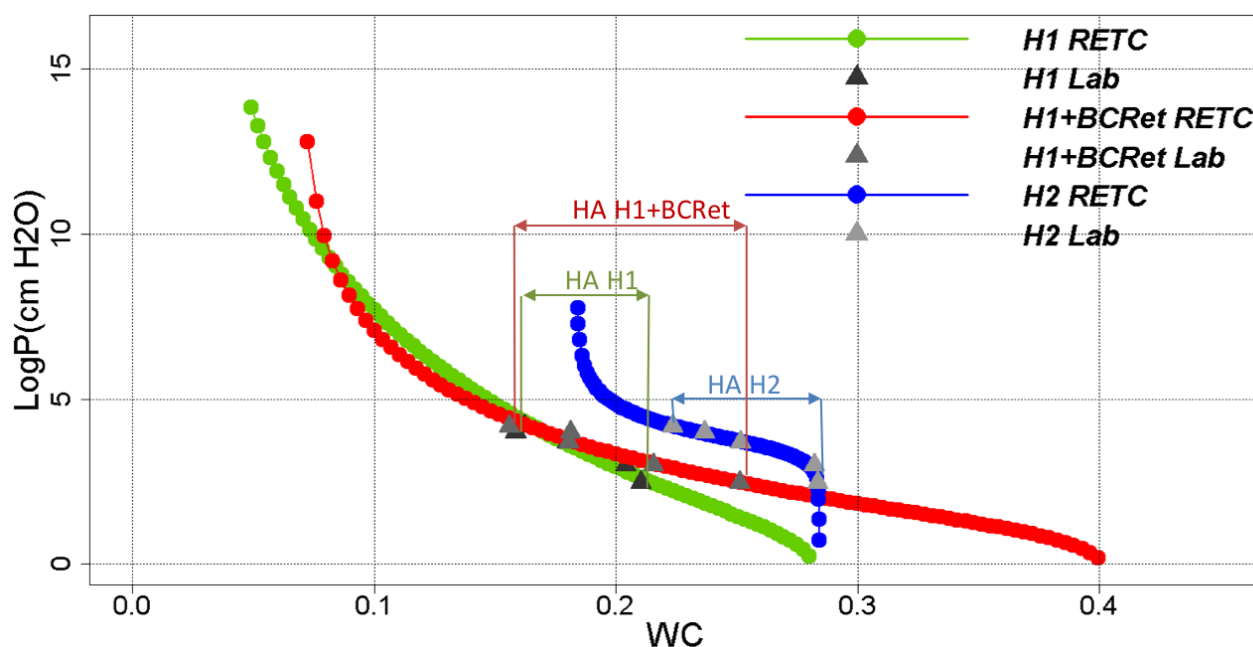


Figura 4-10: CRH de H1 vs H1+BCRet en RETC

4.3. Parámetros de transporte de solutos

En esta sección se muestran los resultados de las BTC o curvas del efluente realizadas en laboratorio, primero para cada horizonte para la obtención de los parámetros de transporte y luego de las columnas de 30 cm de largo y 15 cm de diámetro del suelo inalterado y el suelo con la adición del biocarbonizado para realizar la validación de los datos obtenidos.

4.3.1. Curvas del efluente o BTC

Se realizaron para cada uno de los horizontes, H1, H1+BCRet y H2, en la forma de step; Teniendo en cuenta que la solución problema es NaCl. Todos los datos fueron medidos en laboratorio con sonda de conductividad eléctrica y luego se llevaron a analizar en el cromatógrafo iónico para determinar si los iones medidos correspondían a cloruros, como se observa en el anexo

Horizontes

En Stanmod se llevó a cabo un problema inverso de optimización no lineal, con el tipo de modelo determinístico de equilibrio y No equilibrio de la ecuación de CDE, con una condición de concentración de flujo promedio, en condición de *Step input* en la cual se ingresó como variable medida en laboratorio la velocidad de poros en condición de no saturación y se ajustó el valor del coeficiente de difusividad y se definió como 1 el coeficiente de retardo teniendo en cuenta que se está modelando una sustancia que no se retiene ni interactúa en gran medida con el medio, mostrando un muy buen ajuste con el modelo de No equilibrio, como se observa en las figuras 4-11, 4-12 y 4-13

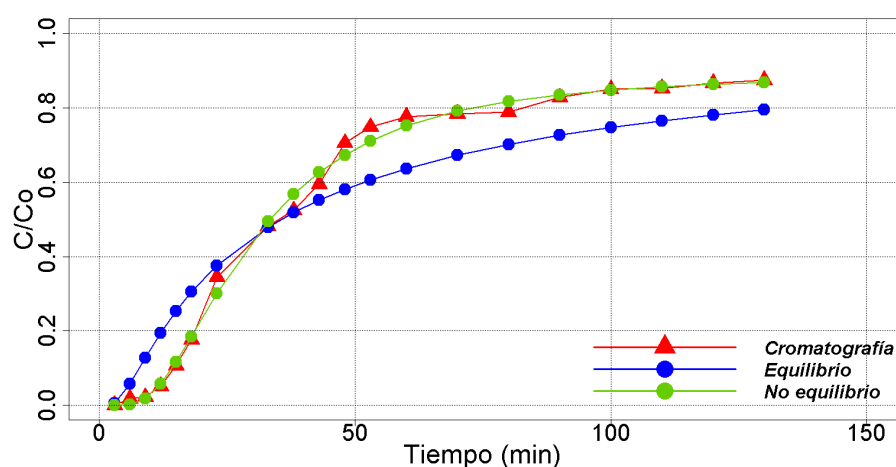


Figura 4-11: Modelos de transporte del primero horizonte H1 en STANMOD, donde los triángulos son los datos observados que se ajustan al modelo de No equilibrio CDE

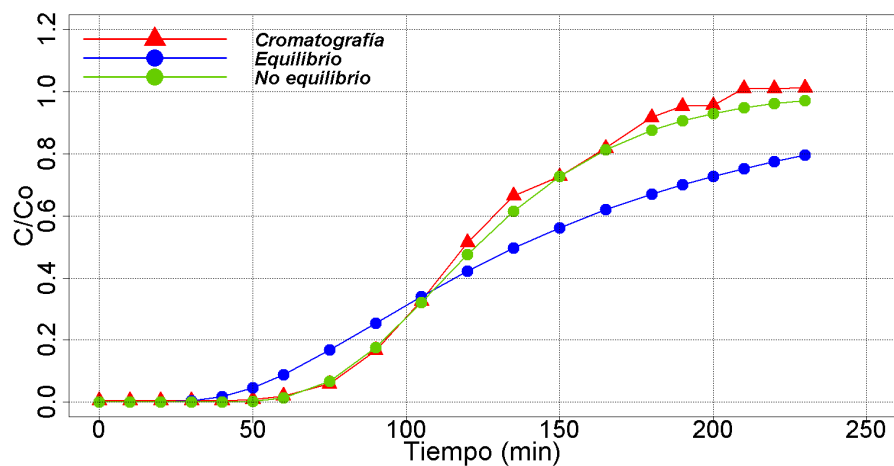


Figura 4-12: Modelos de transporte del horizonte con la adición del BCRet H1+BCRet en STANMOD, donde los triángulos son los datos observados que se ajustan al modelo de no equilibrio CDE

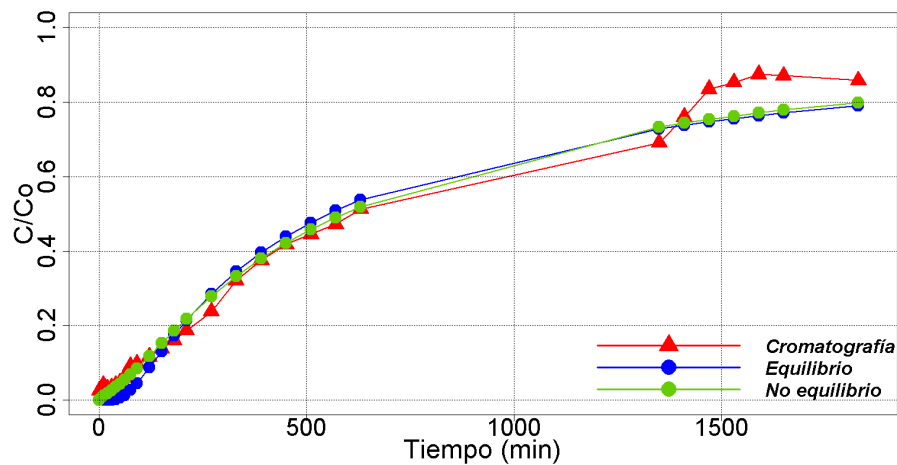


Figura 4-13: Modelos de transporte del segundo horizonte, H2, donde los triángulos son los datos observados que se ajustan al modelo de no equilibrio en STANMOD

En la siguiente figura **4-14** se observa el retardo que tiene la partícula de cloruro en el tiempo para atravesar el horizonte 1 de 17 cm, pasando de 15 minutos a 1 hora aproximadamente, y encontrando su mayor valor de concentración a casi el doble del tiempo para el horizonte medido por separado.

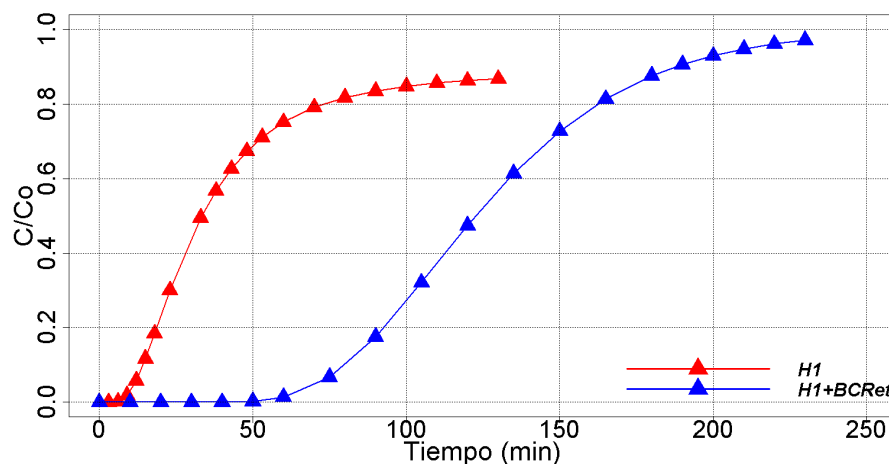


Figura 4-14: Modelos de transporte ajustados por Stanmod de H1 vs H1+BCRet en condiciones de no equilibrio

Se encontró que el modelo que mejor se ajustaba a los horizontes del suelo natural, era Determinístico en NO equilibrio físico de la CDE, explicando la naturaleza del medio poroso, su heterogeneidad en los tamaños de partícula, como se observa en la tabla 4-17

Tabla 4-17: Parámetros de transporte de STANMOD para cada horizonte.

Horizonte	vel poros (cm/min)	D (cm^2/min)	R	Beta	Omega	R^2	MSE
H1	0,08629	0,2028	1	0,3278	0,1649	0,9956	0,00055
H1+BCret	0,0603	0,0345	1	0,7819	0,00001	0,9951	0,0010
H2	0,01084	0,3347	1	0,0074	51,92	0,9822	0,0019

De los anteriores resultados se observó que efectivamente el horizonte con el biocarbonizado presenta el menor valor de coeficiente de dispersión, el horizonte 2 presenta la menor velocidad de poros, asociada a su textura mas arcillosa, adicionalmente presenta un coeficiente Omega medio, el cual muestra una fuerte relación entre la fase móvil e inmóvil.

Columnas

Esta prueba se llevó a cabo haciendo un pulso, para el cual se tuvo en cuenta el volumen de poros (V_p) con el cual se cuantificó la masa del trazador de NaCl aplicado, y el tiempo que tomó la columna para consumir ese volumen se convirtió en el tiempo que relativizó el tiempo a volumen de poro, que por el tiempo que tomaba la prueba se decidió hacer de 0,7

V_p y la velocidad de aplicación fija para las dos columnas fue de 0,018 cm/min en condiciones de no saturación como variables de inicio de la prueba, con una concentración medida por cromatografía iónica de 660 ppm de NaCl para las dos columnas, donde se obtuvieron los valores de la tabla 4-18

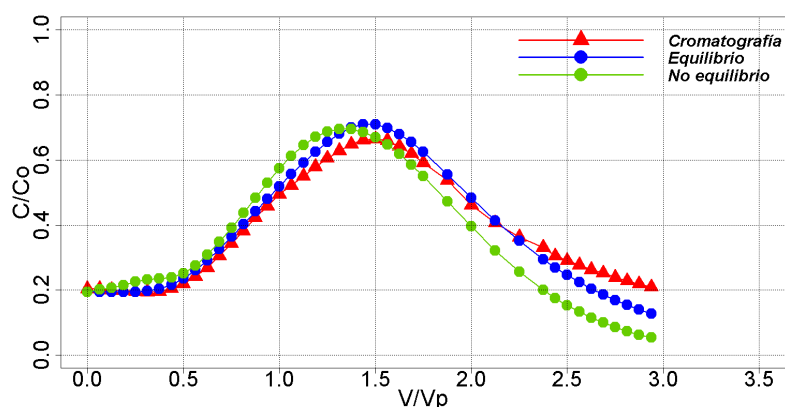


Figura 4-15: Parámetros de transporte de las columnas de suelo testigo, donde los triángulos rojos corresponden a los datos experimentales, en STANMOD

Al realizar esta primera columna se notó una elevada concentración de cloruros inicial, por lo cual se lavó la columna por dos días aproximadamente hasta que la concentración se volvió estable, y se tomó como una concentración residual, como se observa al inicio de la figura 4-15, al tener los datos analizados de cromatografía, se realizó el mismo procedimiento en STANMOD para un pulso, donde se introdujo la información de la velocidad de poros medida en la prueba de 0,171 cm/min y se modeló en equilibrio y no equilibrio CDE, observando que en este caso, el mejor ajuste lo presentaba equilibrio, con una curva simétrica que no presenta una cola prolongada, de donde se obtuvieron los parámetros resumidos en la tabla 4-18.

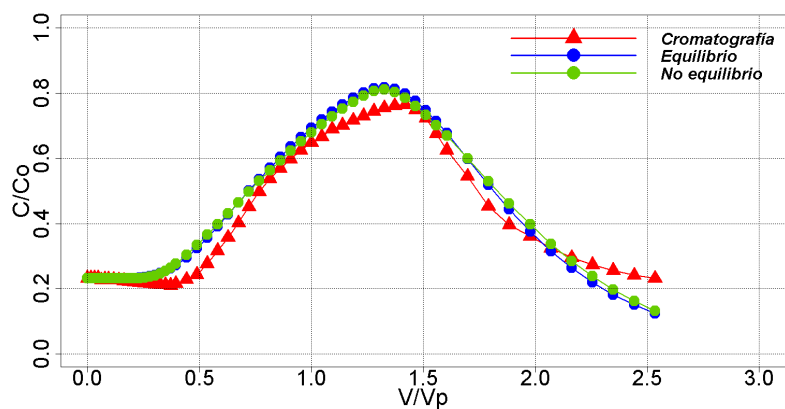


Figura 4-16: Parámetros de transporte de las columnas de suelo y suelo+BCRet en STANMOD en volumen de poros relativo

Al realizar la segunda columna, ahora con la capa donde se adicionó el biocarbonizado de retamo espinoso, se encontró al inicio las mismas condiciones de concentración elevada de cloruros que debió ser lavada por 3 días hasta que se mostró que no había cambio considerable en el tiempo, tomando la concentración como residual del suelo, lo cual se pudo introducir y modelar sin problema en STANMOD, a diferencia de la columna de suelo testigo, esta evidencia una caída mas rápida o una pendiente mayor que en la subida de la concentración, lo que hace pensar que el modelo de equilibrio no se ajuste tan bien como la anterior columna, lo cual se confirma con el ajuste de los modelos de No equilibrio dados por STANMOD obteniendo los parámetros resumidos en la tabla 4-18

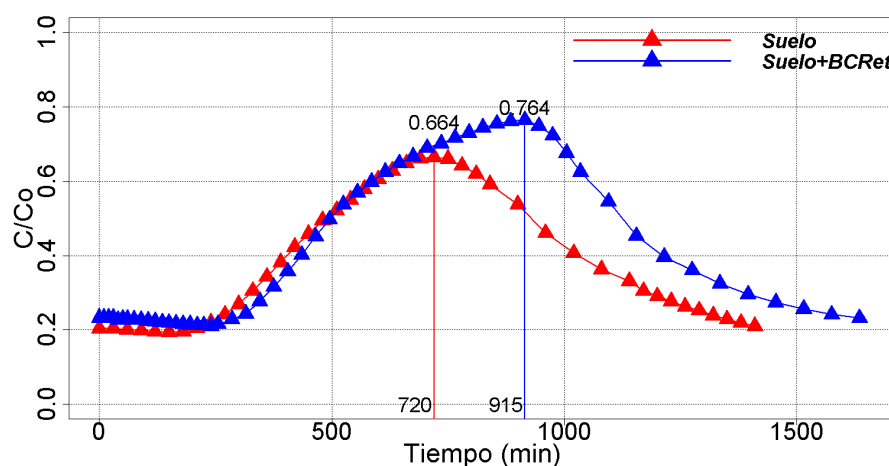


Figura 4-17: Parámetros de transporte de las columnas de suelo y suelo+BCRet en STANMOD con tiempo relativo

En esta figura 4-17 se evidencia que la columna con la adición del biocarbonizado presenta un retardo del pico máximo de concentración en 195 minutos, debido a que el BCRet modificó el pH del oxisol haciendo que se precipite el aluminio como se observó en los resultados químicos, y teniendo en cuenta que el aluminio tiene capacidad de intercambio aniónico, este está cumpliendo la función de retener los cloruros. Sin embargo, al tener una mayor capacidad de retener agua, como se observó en las curvas de retención de humedad, se incrementa la concentración máxima a la cual llega el suelo. Todo lo anterior se resume en la tabla 4-18.

Tabla 4-18: Parámetros de transporte de STANMOD para la columna de Suelo y la columna de Suelo+BCRet.

Horizonte	Modelo	vel poros (cm/min)	D (cm^2/min)	R	Beta	Omega	R^2	MSE
Suelo	Equilibrio CDE	0,0171	0,0697	1	na	na	0,9454	0,0015
Suelo+BCRet	No equili- brio CDE	0,0169	0,01612	1	0,4711	2,841	0,9506	0,0021

En cuanto a los parámetros de transporte de las dos columnas se puede confirmar que el efecto del biocarbonizado en el suelo hace que los solutos se muevan con mas dificultad, pero no en menor concentración, adicionalmente en esta prueba se encontró que el suelo testigo con el cloruro como trazador o solución problema tiene un comportamiento que se puede explicar con las ecuaciones de equilibrio, mientras que el efecto del biocarbonizado, hace que la fase movil e inmovil tenga mayor incidencia en el flujo y transporte de cloruros debido a los diferentes tamaños de partícula que tiene el biocarbonizado.

4.4. Resultados del modelo de flujo y transporte

Para llevar a cabo la simulación del flujo de agua y transporte de cloruros en el oxisol, se hizo necesario usar la información obtenida anteriormente en cuanto a los parámetros de flujo entregados por RETC con los modelos de CRH de van Genuchten y CCH de Mualem y los parámetros de transporte de solutos en equilibrio y no equilibrio de los horizontes H1, H1+BCRet y H2, y las columnas de suelo y suelo+BCRet.

4.4.1. Simulación en HYDRUS

Como parámetros de entrada del modelo se introdujo el número de horizontes, siendo el escenario 1 la columna de suelo testigo, y el escenario 2 la columna de suelo con los 10 cm iniciales combinados con el biocarbonizado en una relación 1:10 de peso, para lo cual cada columna presenta una geometría distinta con puntos de control diferentes como se observa en la figura 4-18

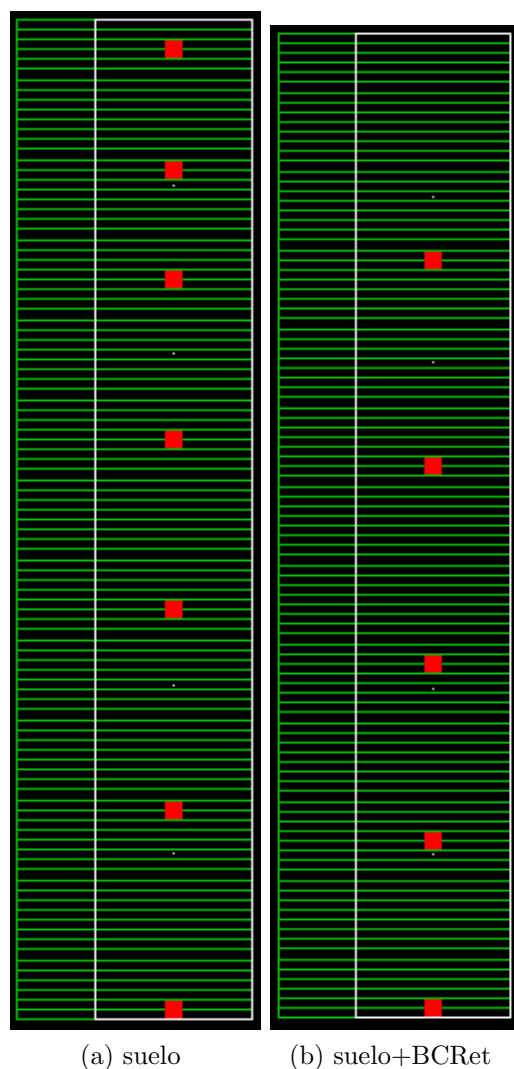


Figura 4-18: Escenarios modelador en HYDRUS, siendo (a) el suelo testigo y (b) el suelo con la adición del biocarbonizado a los 10 cm superiores. (Tomado de HYDRUS 1D)

Luego se escogió el modelo de van Genuchten - Mualem de porosidad simple sin histéresis, siendo este el modelo que mejor ajustó los parámetros de flujo en RETC, luego se introdujeron los parámetros obtenidos de RETC y se definieron las condiciones de frontera de flujo constante y drenaje libre, luego se introdujo la velocidad de aplicación mencionada anteriormente, y se escogió el modelo de mejor ajuste para cada escenario dependiendo de lo que resultó de STANMOD, se introdujo los parámetros de flujo del mismo programa, y la concentración con la cual se llevó a cabo las pruebas de BTC, luego se definió la geometría del modelo con los horizontes y puntos de control, teniendo presente que el punto inferior de la columna o nodo inferior es el que se comparó más adelante para validar el modelo.

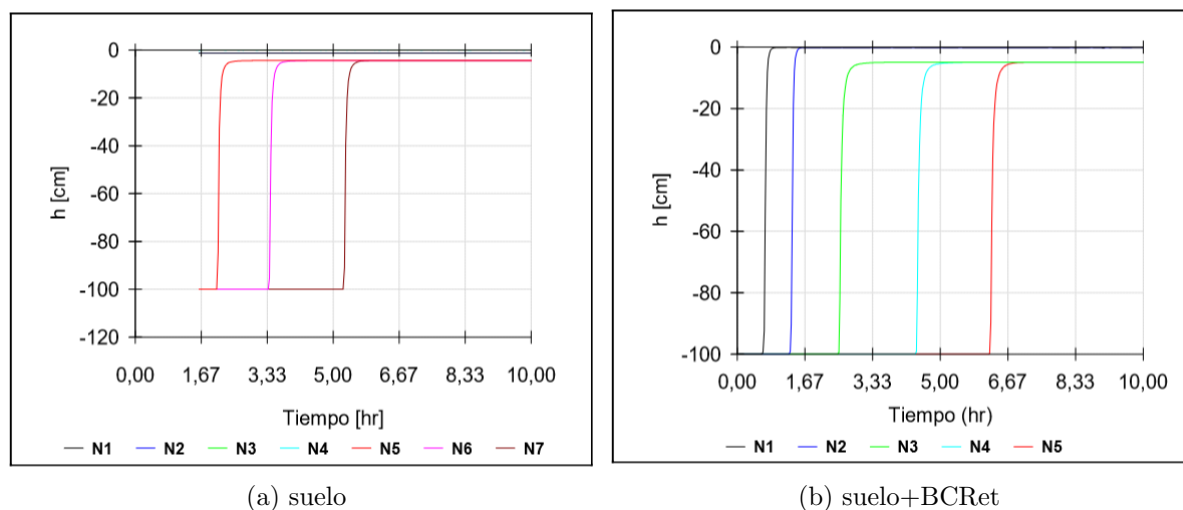


Figura 4-19: Escenarios modelados en HYDRUS, donde se muestra la succión en los nodos, siendo (a) el suelo testigo y (b) el suelo con la adición del biocarbonizado a los 10 cm superiores. (Tomado de HYDRUS 1D)

Como se observa en las gráficas el último nodo de la columna de suelo, llega a estar en condiciones de saturación a las 5 hr, mientras que en la columna de suelo más el biocarbonizado, hay un retardo más de 1 hr, lo cual se confirma con las BTC, donde se observa que la primera traza de cloruro se encuentra a las 4,2 y 5,1 hr respectivamente, lo cual concuerda con la información entregada por HYDRUS en el modelo de flujo.

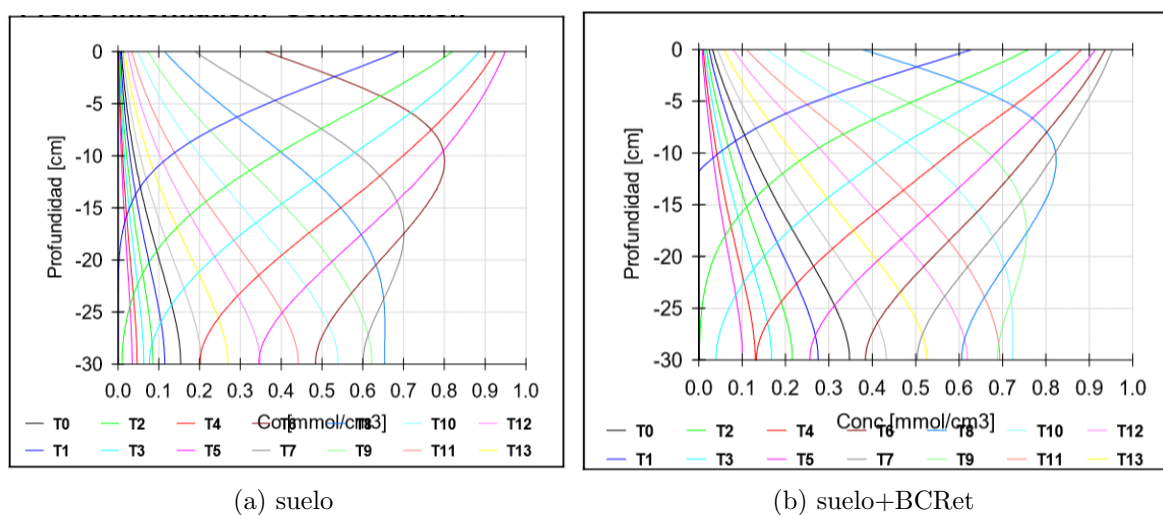


Figura 4-20: Escenarios modelados en HYDRUS, donde se muestra la variación en las concentraciones con respecto a la profundidad, siendo (a) el suelo testigo y (b) el suelo con la adición del biocarbonizado a los 10 cm superiores. (Tomado de HYDRUS 1D)

De acuerdo con esta gráfica se observa la disminución de la concentración a mayor profundidad, donde el suelo testigo muestra una entrega del 65 % de la concentración inicial, mientras que en el suelo con el biocarbonizado se alcanza un 72 %, comprobado anteriormente donde se encontró que el suelo con el BC tiene una mayor capacidad de retener no solo agua, sino agua con solutos, como se observó y analizó en la figura 4-17.

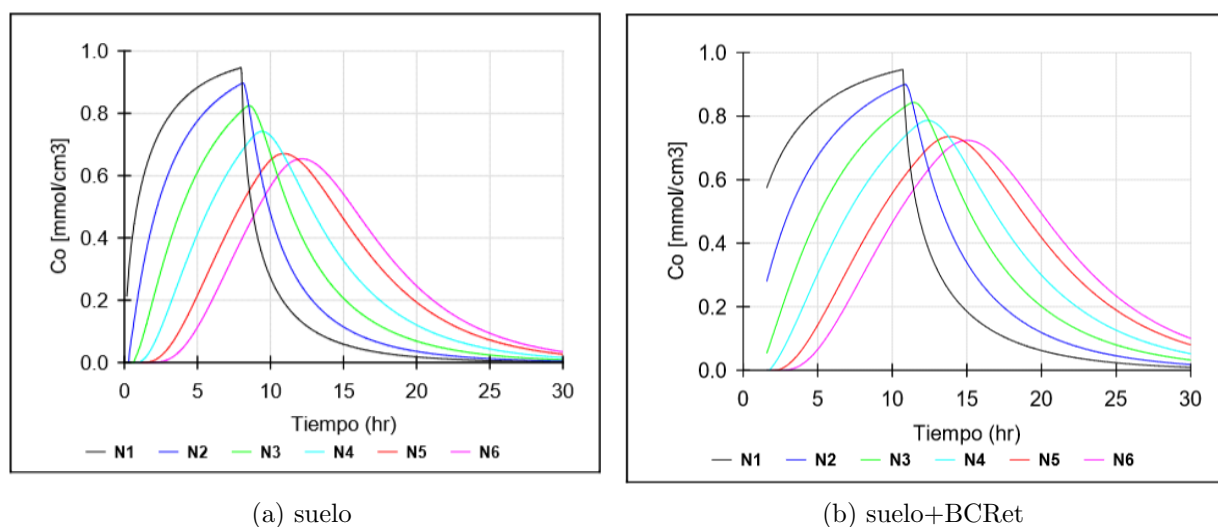


Figura 4-21: Concentraciones en el suelo testigo y el suelo con BCRet con respecto al tiempo (BTC simulado)

Adicionalmente se observa que el modelo de transporte coincide la magnitud de la concentración, en el espacio, definido como el ultimo nodo de ambos escenarios, y en el tiempo, donde el pico máximo de concentración coincide con el pico evidenciado en la figura 4-17 de las BTC, para lo cual a continuación se realiza la validación de los datos obtenidos con HYDRUS vs los datos observados experimentalmente.

4.4.2. Validación del modelo

Con el fin de validar y cuantificar la similitud de los datos obtenidos con HYDRUS vs los datos observados en el laboratorio, se hace uso de las herramientas estadísticas, donde se comparan los datos observados y simulados para cada uno de los escenarios de columna de suelo testigo y columna de suelo con la adición del biocarbonizado.

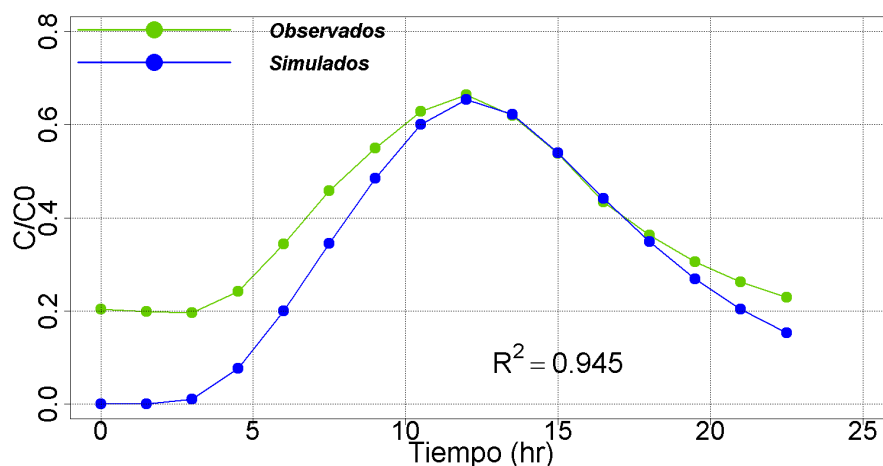


Figura 4-22: Valores experimentales vs valores simulados en la Columna de suelo

Se observa en las figuras 4-22 y 4-23 que los datos simulados ajustan de una mejor forma con los datos observados en laboratorio al momento de lavar las columnas o aplicar solamente agua a las columnas, se puede ver que al momento de iniciar la prueba de pasar el trazador por la columna en el tiempo 0 la columna ya cuenta con una cantidad de cloruros baja pero el modelo empieza desde cero lo cual puede ser uno de las razones por lo cual se ve un menor ajuste en las 15 horas iniciales. Esto debido a que el software HYDRUS para el caso de modelación directa no permite ingresar el contenido de una concentración inicial o residente, lo cual conlleva a un mayor error en estos datos iniciales.

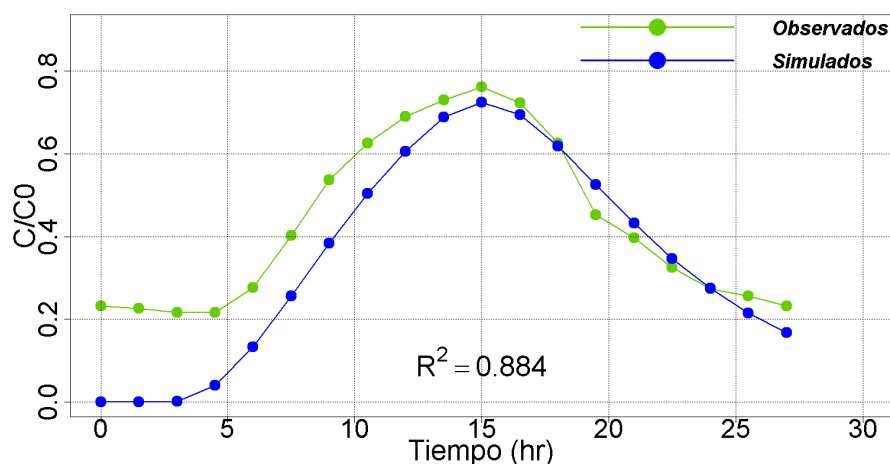


Figura 4-23: Valores experimentales vs valores simulados en la Columna de suelo+BCRet

En la 4-19 se pueden observar los resultados dados de la comparación de los modelos donde el Nash-Sutcliffe (NSE por sus siglas en inglés) donde se determina la magnitud de la

varianza residual que se podría considerar como ruidoz la varianza de los datos observados, evidenciando que los valores obtenidos para los dos modelos son satisfactorios por encima de 0.5.

El índice de concordancia (d) es una una medida estandarizada del grado de error de predicción del modelo y varía entre 0 y 1. Un valor calculado de 1 indica un concordancia perfecta entre los valores medidos y los simulados por lo cual se puede decir que hay una fuerte concordancia en los resultados de los dos modelos, con valores mayores de 0.9 lo cual también corrobora los valores obtenidos en el NSE.

Por otro lado también se puede ver que el error máximo se encuentra en la columna de suelo+BCRet, con un error absoluto medio y un coeficiente de masa residual negativo, lo que nos corrobora lo que se observa en la figura 4-23 que en las primeras 15 horas el modelo de HYDRUS subestima los valores estando por debajo de los valores observados en este tiempo y después alcanzando un mejor ajuste. Para finalizar, el índice E de eficiencia muestra que hay una diferencia moderada entre los datos simulados y los datos observados.

Tabla 4-19: Índices estadísticos para el análisis de comparación de los datos experimentales y los datos simulados en HYDRUS de un suelo testigo y un suelo con BCRet.

Muestra	Índice estadístico*					
	E _{max}	EAM	NRMSE	CMR	E	d
Columna de suelo	0,653	-0,080	11,7	-0,26	0,756	0,921
Columna de suelo+BCret	0,724	-0,083	22,5	-0,24	0,750	0,924

* E_{max} = Error máximo; EAM = Error absoluto medio; NRMSE = Error de la raíz cuadrada media Normalizado; CMR = Coeficiente de masa residual; E = Eficiencia; d = Índice de concordancia de Willmott.

Una vez expuestos los datos obtenidos de la investigación, se introduce el capítulo de conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones en el tema relacionado al flujo de agua y transporte de solutos en la zona vadosa.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Se examinó la retención de cloruros en tres diferentes biocarbonizados; un biocarbonizado de retamo espinoso (BCRet), un carbón activado químicamente de retamo espinoso (CARet) y un carbón activado térmicamente de cuesco de palma de aceite (CAC), donde se encontró que el modelo que mejor se ajustó a las isotermas fue el de Freundlich y que el BC que mayor adsorción de cloruros presentó fue el carbón activado químicamente; sin embargo, fue descartado para la incorporación al suelo debido a que la acidez del mismo estaría impactando negativamente la salud del suelo. Por lo tanto, se escogió el BCRet como el más apropiado para su aplicación al suelo testigo (oxisol), ya que al combinarlo con el suelo, mostró mejora en la adsorción de cloruros, debido a su alto contenido de carbono fijo y materia volátil, y a la presencia de grupos funcionales que le imprimen sus propiedades básicas, adicionalmente se encontró para el suelo y el biocarbonizado que la intensidad de la adsorción en baja.

En este mismo objetivo se encontró una mejora notable en las propiedades físico-químicas del suelo testigo gracias a la incorporación del biocarbonizado en una relación de peso 1:10 como un remediador, ya que aumentó su pH de 4.9 a 5.6 mejorando las condiciones de disponibilidad de nutrientes para las plantas; precipitó el aluminio intercambiable que se encontraba en niveles tóxicos, bajándolo a niveles permisibles para cualquier cultivo y aumentó significativamente el carbono orgánico como alimento del suelo y sus procesos, adicionalmente duplicó valores de fósforo, calcio y potasio.

Se determinó que la adición del biocarbonizado mejoró la capacidad de retención de agua, duplicó la lámina de agua aprovechable, disminuyó la densidad aparente, aumentó considerablemente la densidad real y con esto la porosidad, por otro lado, se evidenció que la conductividad hidráulica del biocarbonizado incorporado al suelo disminuyó a la tercera parte del suelo testigo y mostró un comportamiento mas estable, haciendo que el oxisol aumentara la capacidad de recibir, almacenar y retener mayor cantidad de agua, teniendo impactos positivos en la altillanura colombiana de régimen de lluvias monomodal, donde el suelo puede permanecer seco por casi 6 meses.

Al definir los parámetros de transporte de los dos escenarios, el suelo testigo y el suelo con el biocarbonizado, se evidenció el efecto del BC en el retardo del pico máximo de la concen-

tración de cloruros y la disminución considerable del coeficiente de dispersión, sin embargo, presentó una mayor capacidad de almacenar NaCl, y no presentó una diferencia considerable en su retención.

5.2. Recomendaciones

Para fortalecer la investigación realizada, se recomienda realizar futuros estudios donde se evalúe la capacidad de intercambio aniónico de un suelo testigo y su comportamiento con la adición de biocarbonizados.

Adicionalmente, se propone determinar la microbiología de un suelo oxisol testigo y el mismo con la adición del biocarbonizado para evaluar en el tiempo la biorremediación del mismo.

Por otra parte, se recomienda hacer un análisis geoquímico del suelo y el suelo con el biocarbonizado, adicionalmente evaluar el transporte reactivo de cada especie.

Bibliografía

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., and Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99:19–23.
- Antigüedad, I., Ibarra, V., and Morales, T. (1990). Los trazadores en la hidrogeología kárstica : Metodología de su uso e interpretación de los ensayos de trazado (*) Tracers in the karstic hydrogeology : Methodology of the use and explanation of the tracing results (*). pages 31–45.
- Aumesquet, M. A. (2017). *Análisis de las Configuraciones de Desalación RO/PRO de la Patente US 9,428,406 B2*. PhD thesis, Universidad de Sevilla.
- C. LÓPEZ-MATEO, E. ÁLVAREZ, M. F.-M. (2005). ADSORCIÓN Y DESORCIÓN DE POTASIO EN SUELOS DE GALICIA (ESPAÑA) DESARROLLADOS SOBRE DISTINTOS MATERIALES DE PARTIDA. 12(3).
- Castro, H. (1998). Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas. *Instituto Universitario Juan de Castellanos, Tunja*.
- Castro Franco, Hugo Eduardo y Fundación Universitario Juan De Castellanos. . Tunja, C. (1998). *Fundamentos para el conocimiento y manejo de suelos agrícolas : manual técnico*. Produmedios, Tunja.
- Chaves, L. H. G., Brito, M. E. B., Carvalho, A. D. P., Daniel, R., Ribeiro, S., and Santos, R. T. (2009). Adsorção de cobre em amostras de Plintossolo do Estado do Piauí , com diferentes características Copper adsorption in Plinthosol samples from Piauí State , Brazil , with different characteristics. (83):226–232.
- Delleur, J. W. (2008). *The Handbook of Groundwater Engineering*, volume 7.
- Ferrari, A. C. and Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. 61(20):95–107.
- Fredlund, D. G., Sheng, D., and Zhao, J. (2011). Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve Estimation of soil suction from the soil-water characteristic curve. (FEBRUARY).

- Gen, L., Bing, B., and Kenneth H., C. n. (2015). Characterization of solids in produced water from wells fractured with.pdf. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 144:91–98.
- Gómez, A., Cruz-Dominguez, L. ., Jiménez-Madrid, A. ., Ocampo-Duran, D. ., and Parra-González, A. . (2016). Biochar As an Amendment in an Oxisol and Its Effect on the Growth of Corn. 19(2):341–349.
- Goodwin, S., Carlson, K., Bai, B., Rein, L., Knox, K., and Douglas, C. (2013). Improved Water Use Estimates for Drilling and Hydraulic Fracturing in Northeastern Colorado. *Journal of Water Resources and Protection*, 2013(December):1262–1267.
- Gregory, K. B., Vidic, R. D., and Dzombak, D. A. (2011a). Water management challenges associated with the production of shale gas by hydraulic fracturing. *Elements*, 7(3):181–186.
- Gregory, K. B., Vidic, R. D., and Dzombak, D. A. (2011b). Water management challenges associated with the production of shale gas by hydraulic fracturing. *Elements*, 7(3):181–186.
- Hidrocarburos, A. N. d. (2016). Producción fiscalizada de crudo 21-04-2016. Technical report.
- IGAC (2006). *Metodos analiticos del laboratorio de suelos*, volume 6.
- IGAC (2014). Instituto geográfico agustín codazzi- igac plan de desarrollo institucional. (3).
- J. Veil, M.G. Puder, D. E. R. R. (2004). A White Paper Describing Produced Water from Production of Crude Oil , Natural Gas, and Coal Bed Methane U.S. Department of Energy. Technical report, U.S. Department of Energy.
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*.
- Jarvis, N. J., Jansson, P.-E., and Dik, P. E. Modelling water and solute transport in macroporous soil. I. Model description and sensitivity analysis. *Journal of Soil Science*, 19942(1):59–70.
- J.J Song, D.D.L. Chung, and Eklund, P.-C. (1976). RAMAN SCATTERING IN GRAPHITE INTERCALATION COMPOUNDS. *Center for Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology*, 20:1111–1115.
- Kambo, H. S. and Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45:359–378.

- Kanzari, S., Hachicha, M., and Bouhlila, R. (2015). Laboratory Method for Estimating Solute Transport Parameters of Unsaturated Soils. 1(4):149–154.
- Komang T., R.-S. and Caroline, H. O. (2016). *Biochar Application Essential Soil Microbial Ecology*.
- Kpeglo, D. O., Mantero, J., Darko, E. O., Emi-Reynolds, G., Faanu, A., Manjón, G., Vioque, I., Akaho, E. H. K., and Garcia-Tenorio, R. (2016). Radiochemical characterization of produced water from two production offshore oilfields in Ghana. *Journal of Environmental Radioactivity*, 152:35–45.
- LIMA, L. J. D. S. (2003). *TRANSPORTE DE ÁGUA E DE SOLUTO EM UM LATOSSOLO DO BREJO PARAIBANO : EXPERIMENTO DE CAMPO E PARAMETRIZAÇÃO*. PhD thesis, UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR PROGRAMA.
- Melendez, M., Jiménez-Sánchez, M., Dominguez-Cuesta, M., and Rodriguez, L. (2011). TÉCNICAS APLICADAS A LA CARACTERIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS GEOLÓGICO-MINEROS. Number January, chapter Aplicación.
- Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ortega, A. T., and Sandoval, J. A. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Review of the current state of wastewater management in the Colombian oil industry*, 21(1):87–98.
- Mr.M.Shanmugasundaram, Dr.K.Sudalaimani (2012). A STUDY ON NATURAL ADSORBENTS FOR THE REMOVAL OF CHLORIDE ION IN WATER. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, (2012).
- Norzagaray, M., Cárdenas, O. L., and Muñoz, P. (2017). Estimación de la dispersividad hidrodinámica usando trazadores. Number January 2013.
- Orjuela-Matta, H. M., Rubiano Sanabria, Y., and Camacho-Tamayo, J. H. (2010). Comportamiento de la infiltración en un oxisol. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 13(2):31–39.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., and de Laburu, C. (1994). *Edafología : para la agricultura y el medio ambiente*. Madrid, Spain, isbn edition.
- Raja, S., Cheema, H. M. N., Babar, S., Khan, A. A., Murtaza, G., and Aslam, U. (2015). Socio-economic background of wastewater irrigation and bioaccumulation of heavy metals in crops and vegetables. *Agricultural Water Management*, 158:26–34.

- Rice, E., Baird, R., and Eaton, A. (2017). 4500-Cl Chlorine (Residual). In Rice, E., Baird, R., and Eaton, A., editors, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, chapter Part 4000:, pages 61–74. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Rossi, M. M. S. (2011). *ADSORCIÓN Y DESORCIÓN DE FÓSFORO EN SUELOS DEL ÁREA CENTRAL DE LA REGIÓN PAMPEANA*. PhD thesis, Universidad Nacional de Córdoba.
- Safaei Khorram, M., Zhang, Q., Lin, D., Zheng, Y., Fang, H., and Yu, Y. (2015). Biochar: A review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 44:269–279.
- Sánchez, N., Subero, N., and Rivero, C. (2019). Determinación de la adsorción de cadmio mediante isotermas de adsorción en suelos agrícolas venezolanos. 60(2011):1–7.
- Scanlon, B. R., Weingarten, M. B., Murray, K. E., and Reedy, R. C. (2019). Managing Basin-Scale Fluid Budgets to Reduce Injection-Induced Seismicity from the Recent U . S . Shale Oil Revolution. *Seismological Research Letters*, pages 171–182.
- Sierra Ramírez, C. A. (2011). Manejo y análisis de datos de calidad del agua. In *Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico*.
- Simunek, J., van Genuchten, M. T., Sejna, M., Toride, N., and Leij, F. J. (1999). The STANMOD Computer Software for Evaluating Solute Transport in Porous Media Using Analytical Solutions of Convection-Dispersion Equation. *Agriculture*, (November):20.
- Soil Survey Staff (1999). *Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. second edition.
- Sun, Z., Chai, L., Shu, Y., Li, Q., Liu, M., and Qiu, D. (2017). Chemical bond between chloride ions and surface carboxyl groups on activated carbon. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 530(February):53–59.
- Szymkiewicz, A. (2013). *Modelling Water Flow in Unsaturated Porous Media*, volume 9.
- Tindall, J. A., Kunkel, J. R., and Anderson, D. A. (1988). Contaminant transport.
- van Genuchten, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils1. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5):892.
- van Genuchten, M. T., Leij, F. J., and Yates, S. R. (1991a). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. In *United States Environmental Research Laboratory*, number December, page 93.

- van Genuchten, M. T., Leij, F. J., and Yates, S. R. (1991b). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. *United States Environmental Research Laboratory*, (December):93.
- van Genuchten, M. T. and W. J. Alves (1984). Analytical solutions of the one-dimensional convective-dispersive solute transport equation. *Usda*, 9(1661):79–80.
- Vargas, D. P., Girado, L., and Moreno, C. (2010). INMERSIÓN DE CARBON ACTIVADO EN SOLUCIONES ACUOSAS DE 3- CLORO FENOL A DIFERENTE pH. 39(2010):1–8.
- Vilela, N. M. S., Thebaldi, M. S., Leal, B. D. P., Silva, A. V., and Martins, I. P. (2018). TRANSPORT PARAMETERS OF POTASSIUM FROM DIFFERENT SOURCES IN SOIL COLUMNS. 4430:135–141.
- Wang, Y., Alsmeyer, D. C., and McCreery, R. L. (1990). Raman Spectroscopy of Carbon Materials: Structural Basis of Observed Spectra. *Department of Chemistry, The Ohio State University, 120 W. 18th Ave., Columbus, Ohio*, (10):557–563.
- Wilson, L. G., Everett, L. G., and Cullen, S. J. (1995). *Handbook of VADOSE ZONE CHARACTERIZATION AND MONITORING*.
- Zhang, S., Zhu, X., Zhou, S., Shang, H., Luo, J., and Tsang, D. C. (2018). *Hydrothermal Carbonization for Hydrochar Production and Its Application*. Elsevier Inc.

6 Anexos

En las tablas **6-1** y **6-2** se presentará la información resumida para las pruebas de trazadores en las columnas de suelo y suelo+biocarbonizado, de los análisis de laboratorio de Ingeniería ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, como se observa al final de estos anexos. Donde cada tubo falcon corresponde a un tiempo determinado, expuesto en las gráficas del anterior capítulo.

Tabla 6-1: Resultados de laboratorio de la cromatografía iónica de la columna de suelo

Falcon	Num Lab	Cloruros (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)
S-00	35664	96,87	0,48	0,27
S-01	35665	90,82	0,29	5,13
S-02	35666	88,42	0,24	5,48
S-03	35667	89,47	0,23	5,01
S-04	35668	100,54	0,22	4,19
S-05	35669	111,99	0,26	3,39
S-06	35670	143,39	1,21	3,02
S-07	35671	156,44	0,27	2,53
S-08	35672	168,12	0,248	2,3
S-09	35673	186,05	0,22	1,84
S-10	35674	214,74	0,282	1,82
S-11	35675	242,346	0,216	1,28
S-12	35676	261,64	0,34	1,56
S-13	35677	290,3	0,2	1,72
S-14	35678	304,998	0,22	1,22
S-15	35679	316,28	0,136	0,64
S-17	35681	352,44	0,28	1,04

Sigue en la página siguiente.

Falcon	Num Lab	Cloruros (mg/L)	Nitratos (mg/L)	Sulfatos (mg/L)
S-18	35682	369,824	0,2	0,92
S-19	35683	383,56	0,24	0,72
S-20	35684	372,96	0,28	1,08
S-21	35685	365	0,24	1,32
S-22	35686	317,68	0,16	1,52
S-23	35687	290	0,1	1,96
S-24	35688	246,5	0,1	2,8
S-25	35689	195,7	0,1	3,2
S-26	35690	157,08	0,1	3,8
S-27	35691	135,23	0,2	5,4
S-28	35692	111,97	0,28	5,5
S-29	35693	92,39	0,34	7
S-30	35694	86,87	0,32	6,6
S-31	35695	81,78	0,31	7,2
S-32	35696	67,63	0,29	7,04
S-33	35697	57,89	0,28	7
S-34	35698	55,24	0,2	6,9
S-35	35699	51,79	0,31	7,03
Trazador	35700	608,25	0,42	4,35

En la siguiente tabla no se muestran los valores de nitratos, debido a su bajo contenido, cerca a valores de no detección.

Tabla 6-2: Resultados de laboratorio de la cromatografía iónica de la columna de suelo+biocarbonizado

Falcon	Num Lab	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)
sbc-0	35766	130,38	3,57
sbc-1	35767	132,28	3,5

Sigue en la página siguiente.

Falcon	Num Lab	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)
sbc-2	35768	128,98	0,59
sbc-3	35769	131,42	3,85
sbc-4	35770	126,65	3
sbc-5	35771	123,52	3,73
sbc-6	35772	117,57	3,58
sbc-7	35773	115,4	3,5
sbc-8	35774	131,98	3,5
sbc-9	35775	142,18	2,5
sbc-10	35776	160,08	1,6
sbc-11	35777	197,28	1,5
sbc-12	35778	225,2	1,56
sbc-13	35779	292,5	1,03
sbc-14	35780	327,24	0,7
sbc-15	35781	335,32	0,24
sbc-16	35782	346	0,9
sbc-17	35783	381,6	0
sbc-18	35784	393,84	0,4
sbc-19	35785	398,56	0,2
sbc-20	35786	408,9	0,2
sbc-21	35787	453,1	0,2
sbc-22	35788	477,6	0,1
sbc-23	35789	481,75	0,1
sbc-24	35790	494,2	0,1
sbc-25	35791	474,5	0,2
sbc-26	35792	396,56	0,7
sbc-27	35793	328,48	0,9
sbc-28	35794	289,7	1,02
sbc-29	35795	249,1	1,6

Sigue en la página siguiente.

Falcon	Num Lab	Cloruros (mg/L)	Sulfatos (mg/L)
sbc-30	35796	218,7	1,5
sbc-31	35797	203,96	1,56
sbc-32	35798	187,06	3,85
sbc-33	35799	149,32	3
sbc-34	35800	153,56	3,73
sbc-35	35801	142,64	3,58
trazador	35802	658,55	4,35

A continuación se muestran los resultados de cada horizonte, donde se realizó la prueba del bromuro como trazador, se evidenció que su comportamiento es muy similar al cloruro y no mostró información relevante.

Bogotá, D.C. 20 de Diciembre de 2019

[LIA-078-19]

Estudiante

DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Est. MSc Ing - Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Asunto: Remisión de Informes de resultados.

Cordial saludo,

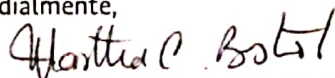
Respetada Diana Catalina, para los fines pertinentes se hace entrega de los resultados de las muestras a continuación relacionadas:

No. Análisis	Procedencia
35380	CAMPO RUBIALES, H1B-0.
35381	CAMPO RUBIALES, H1-1.
35382	CAMPO RUBIALES, H1-3.
35383	CAMPO RUBIALES, H1-4.
35384	CAMPO RUBIALES, H1-5.
35385	CAMPO RUBIALES, H1-6.
35386	CAMPO RUBIALES, H1-8.
35387	CAMPO RUBIALES, H1-9.
35388	CAMPO RUBIALES, H1-10.
35389	CAMPO RUBIALES, H1-11.
35390	CAMPO RUBIALES, H1-12.
35391	CAMPO RUBIALES, H1-13.
35392	CAMPO RUBIALES, H1-15.
35393	CAMPO RUBIALES, H1-16.
35394	CAMPO RUBIALES, H1-17.
35395	CAMPO RUBIALES, H1-18.
35396	CAMPO RUBIALES, H1-19.
35397	CAMPO RUBIALES, H1-20.
35398	CAMPO RUBIALES, H1-21.

20
AÑOS Bicentenario

35399	CAMPO RUBIALES, H1-22.
35400	CAMPO RUBIALES, H2-B-0.
35401	CAMPO RUBIALES, H-2-1.
35402	CAMPO RUBIALES, H-2-2.
35403	CAMPO RUBIALES, H-2-3.
35404	CAMPO RUBIALES, H-2-4.
35405	CAMPO RUBIALES, H-2-5.
35406	CAMPO RUBIALES, H-2-6.
35407	CAMPO RUBIALES, H-2-7.
35408	CAMPO RUBIALES, H-2-8.
35409	CAMPO RUBIALES, H-2-9.
35410	CAMPO RUBIALES, H-2-10.
35411	CAMPO RUBIALES, H-2-11.
35412	CAMPO RUBIALES, H-2-12.
35413	CAMPO RUBIALES, H-2-13.
35414	CAMPO RUBIALES, H-2-14.
35415	CAMPO RUBIALES, H-2-15.
35416	CAMPO RUBIALES, H-2-16.
35417	CAMPO RUBIALES, H-2-17.
35418	CAMPO RUBIALES, H-2-18.
35419	CAMPO RUBIALES, H-2-19.
35420	CAMPO RUBIALES, H-2-20.
35421	CAMPO RUBIALES, H-2-21.
35422	CAMPO RUBIALES, H-2-22.
35423	CAMPO RUBIALES, H-2-23.
35424	CAMPO RUBIALES, H-2-24.
35425	CAMPO RUBIALES, H-2-25.
35426	CAMPO RUBIALES, H-2-26.
35427	CAMPO RUBIALES, H-2-27.
35428	CAMPO RUBIALES, H-2-28.
35429	CAMPO RUBIALES, H-2-29.
35430	CAMPO RUBIALES, H-2-30.

Cordialmente,

**Dra. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ**Coordinadora del Laboratorio de Ingeniería Ambiental
Bogotá, Universidad Nacional de Colombia.

**LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS**



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ.
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35380
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C A C V
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H18-0
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Nefelometria	< 0,1
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	0,2

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.

Martha C. Bustos

DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental



Q. César Augusto Córvelandia

Q. CÉSAR AUGUSTO CÓRVELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ.
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35381
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-1.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	0,2
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	13,2

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

**LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS**



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63, BOGOTÁ
Teléfono Fijo/Fax/Móvil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANÁLISIS N°: 35382
Cotización N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-3
Punto de Captación: NO APLICA
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	2,1
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	16,1

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervisión del mismo, por lo que estos resultados son solamente válidos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35383
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-4
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	12,8
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	37,1

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63. BOGOTÁ.
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35384
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-5.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

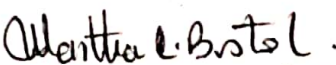
Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	36,2
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	76,6

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

**LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS**



INFORMACIÓN DEL CLIENTE			
Cliente:	ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)		ANÁLISIS N°: 35385
Persona a contactar:	DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES		Cotización N°: 255-2019
Dirección / Ciudad:	CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ		Orden de trabajo: 105-2019
Teléfono Fijo/Fax/Móvil:	311-8035015		Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Registro:	2019-11-07		Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
Municipio:	PUERTO GAITÁN		Departamento: META
Procedencia:	CAMPO RUBIALES, H1-6		Toma de Muestra: NO
Punto de Captación:	NO APLICA		Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Fecha De Toma de Muestra:	2019-10-14		Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br	Cromatografía Iónica	58,6
Cloruros	mg/L Cl	Cromatografía Iónica	127,1

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervisión del mismo, por lo que estos resultados son solamente válidos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35386
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-8.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	126.0
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	248.0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ.
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35387
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-9
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br	Cromatografía Iónica	169,0
Cloruros	mg/L Cl	Cromatografía Iónica	363,0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63. BOGOTÁ.
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35388
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-10.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	171,0
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	357,0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.

DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental



Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35389
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-11.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	163,0
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	367,0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35390
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-12.
Punto de Captación: NO APLICA
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	267.0
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	539.0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63. BOGOTÁ.
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35391
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-13.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	284,0
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	568,0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CUENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
 Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
 Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 87-83 BOGOTÁ
 Teléfono Fijo/Fax/Móvil: 311-8038018
 Fecha de Registro: 2019-11-27

ANÁLISIS N°: 35392
 Cotización N°: 255-2019
 Orden de trabajo: 105-2019
 Recibida por: C.A.C.V.
 Fecha de Entrega: 2019-12-19

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
 Procedencia: CAMPO RUBIALES H-15
 Punto de Captación: NO APLICA
 Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
 Toma de Muestra: NO
 Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
 Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br	Cromatografía Iónica	252.0
Cloruros	mg/L Cl	Cromatografía Iónica	529.0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervisión del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.

Martha C. Bustos L.
 DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
 Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental



César Augusto Coy Velandia
 Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
 Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63. BOGOTÁ.
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35393
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-16.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	264,0
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	596,0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
 Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
 Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ
 Teléfono Fijo/Fax/Móvil: 311-8035015
 Fecha de Registro: 2019-11-07

ANÁLISIS N°: 35394
 Cotización N°: 255-2019
 Orden de trabajo: 105-2019
 Recibida por: C.A.C.V.
 Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
 Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-17.
 Punto de Captación: NO APLICA.
 Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
 Toma de Muestra: NO
 Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
 Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br	Cromatografía Iónica	314.0
Cloruros	mg/L Cl	Cromatografía Iónica	614.0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervisión del mismo, por lo que estos resultados son solamente válidos para esta muestra.

Martha C. Bustos
 DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
 Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental



César Augusto Coy Velandía
 Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
 Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63. BOGOTÁ
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35395
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-18.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	282,0
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	566,0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
 Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
 Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 87-83 BOGOTÁ
 Teléfono Fijo/Fax/Móvil: 511-8035015
 Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS Nº: 35398
 Cotización Nº: 255-2019
 Orden de trabajo: 105-2019
 Recibido por: C.A.C.V.
 Fecha de Entrega: 2019-12-18

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
 Procedencia: CAMPO RUBIALES, HS-18
 Punto de Captación: NO APLICA
 Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
 Toma de Muestra: NO
 Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
 Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Hexamuros	mg/L Br	Cromatografía Iónica	318.0
Cloruros	mg/L Cl	Cromatografía Iónica	624.0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervisión del mismo, por lo que estos resultados son solamente válidos para esta muestra.


 DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
 Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




 Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
 Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL INFORME DE RESULTADOS



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ.
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35397
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-20.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br ⁻	Cromatografía Iónica	312,0
Cloruros	mg/L Cl ⁻	Cromatografía Iónica	612,0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63. BOGOTÁ.
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANALISIS N°: 35398
Cotizacion N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-21.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br	Cromatografía Iónica	319,0
Cloruros	mg/L Cl	Cromatografía Iónica	630,0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervision del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3246

LABORATORIO INGENIERIA AMBIENTAL
INFORME DE RESULTADOS



INFORMACIÓN DEL CLIENTE

Cliente: ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIEROS DE PETROLEOS (ACIPET)
Persona a contactar: DIANA CATALINA JIMÉNEZ TORRES
Dirección / Ciudad: CRA 14 No. 97-63 BOGOTÁ
Telefono Fijo/Fax/Movil: 311-8035015
Fecha de Registro: 2019-11-07

ANÁLISIS N°: 35399
Cotización N°: 255-2019
Orden de trabajo: 105-2019
Recibida por: C.A.C.V.
Fecha de Entrega: 2019-12-16

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Municipio: PUERTO GAITÁN
Procedencia: CAMPO RUBIALES, H1-22.
Punto de Captación: NO APLICA.
Fecha De Toma de Muestra: 2019-10-14

Departamento: META
Toma de Muestra: NO
Tipo de Muestra: AGUA TRATADA
Tipo Toma de Muestra: PUNTUAL

RESULTADOS

Parámetro	Unidades	Método	Resultado
Bromuros	mg/L Br	Cromatografía Iónica	549.0
Cloruros	mg/L Cl	Cromatografía Iónica	720.0

OBSERVACIONES:

La muestra analizada No fue recolectada por personal del laboratorio ni bajo supervisión del mismo, por lo que estos resultados son solamente validos para esta muestra.


DRA. MARTHA CRISTINA BUSTOS LÓPEZ
Coordinadora Laboratorio Ing Ambiental




Q. CÉSAR AUGUSTO COY VELANDIA
Responsable Técnico M.P. Q-3245